



SKRIPSI - ME141501

PERANCANGAN SISTEM KENDALI *HEADING* DAN KEDALAMAN KAPAL SELAM DENGAN MENGGUNAKAN KONTROL LOGIKA *FUZZY*

Josua Joel Jireh Dededaka
NRP 04211440000018

Dosen Pembimbing

Ir. Agoes Achmad Masroeri, M.Eng., D.Eng
Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018



SKRIPSI - ME 141501

**PERANCANGAN SISTEM KENDALI *HEADING* DAN KEDALAMAN
KAPAL SELAM DENGAN MENGGUNAKAN KONTROL LOGIKA
*FUZZY***

Josua Joel Jireh Dededaka
NRP 04211440000018

Dosen Pembimbing
Ir. Agoes Achmad Masroeri, M. Eng., D. Eng
Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
2018

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



BACHELOR THESIS - ME 141501

DESIGN OF SUBMARINE HEADING AND DEPTH CONTROL SYSTEM USING FUZZY LOGIC CONTROLLER

Josua Joel Jireh Dededaka
NRP 04211440000018

Supervisors

Ir. Agoes Achmad Masroeri, M. Eng., D. Eng
Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T

DEPARTMENT OF MARINE ENGINEERING
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
2018

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

PERANCANGAN SISTEM KENDALI *HEADING* DAN KEDALAMAN KAPAL SELAM DENGAN MENGGUNAKAN KONTROL LOGIKA *FUZZY*

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

Bidang Studi *Marine Electrical and Automation System*
Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Josua Joel Jireh Dededaka
NRP. 04211440000018

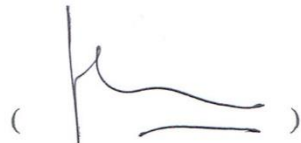
Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

Ir. Agoes Achmad Masroeri, M. Eng., D. Eng
NIP. 195808071984031004



()

Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T
NIP. 196601161989032001



()

Surabaya,
Juli 2018

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

PERANCANGAN SISTEM KENDALI *HEADING* DAN KEDALAMAN KAPAL SELAM DENGAN MENGGUNAKAN KONTROL LOGIKA *FUZZY*

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

Bidang Studi *Marine Electrical and Automation System*
Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Josua Joel Jireh Dededaka
NRP. 04211440000018

Disetujui oleh Kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan :



Dr. Eng. M. Badrus Zaman., ST., MT
NIP. 1977-0802-2008 01 1007

Surabaya,
Juli 2018

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Perancangan Sistem Kendali *Heading* dan Kedalaman Kapal Selam dengan Menggunakan Kontrol Logika Fuzzy

Nama Mahasiswa : Josua Joel Jireh Dededaka

NRP : 04211440000018

Departemen : Teknik Sistem Perkapalan ITS

Dosen Pembimbing 1 : Ir. Agoes Achmad Masroeri, M. Eng., D. Eng

Dosen Pembimbing 2 : Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T

Abstrak

Perbedaan utama kapal selam dengan kapal permukaan adalah kemampuannya bergerak secara tiga dimensi, dimana kapal permukaan hanya dapat bergerak pada bidang horizontal.. Dalam melakukan manuver di bawah permukaan air, dibutuhkan sebuah sistem kendali. Kendali manuver kapal selam dilakukan dengan mengatur sudut aktuator berupa *rudder* dan *stern plane*. Metode kontrol yang umum dipakai adalah metode kontrol PID (*Proportional, Integral, and Derivative*), sehingga dibutuhkan model matematika dengan tingkat akurasi yang tinggi atau *tuning* yang dilakukan oleh pengguna. Metode sistem kendali alternatif yang digunakan pada tugas akhir ini adalah kendali logika *fuzzy*. Kelebihan kendali logika *fuzzy* terletak pada kesederhanaan dan kemampuan untuk bekerja secara lebih fleksibel dalam berbagai kondisi. Fungsi kontrol logika *fuzzy* pada perancangan ini adalah menerima masukan berupa *error yaw* dan *yaw rate* kemudian menghasilkan keluaran berupa besar sudut *rudder* sebagai aktuator sistem kendali *heading*, dan pada sistem kendali kedalaman masukan *error kedalaman* dan *heave rate* kemudian menghasilkan keluaran berupa besar sudut *stern plane* sebagai aktuator sistem kendali kedalaman, sesuai dengan kaidah logika *fuzzy*. Penelitian diawali dengan pemodelan 3D, kemudian dilanjutkan dengan pemodelan matematis kapal selam. Setelah model matematis diperoleh, dilanjutkan dengan merancang sistem kendali *fuzzy*. Pada penelitian ini dilakukan perbandingan antara kendali *fuzzy* dan kendali PID. Simulasi sistem kendali yang dilakukan berupa simulasi sistem kendali *heading* dan kedalaman dengan *setpoint* konstan dan *setpoint* berubah. Pada simulasi sistem kendali *heading* dengan *setpoint* konstan (30°) diperoleh performansi kendali *fuzzy* dengan *delay time* selama 150,224 s, *rise time* dan *settling time* selama 650,191 s, tanpa adanya *overshoot* dan *steady-state error*. Pada simulasi sistem kendali kedalaman dengan *setpoint* konstan (50 m) diperoleh performansi kendali *fuzzy* dengan *delay time* selama 123,762 s, *rise time* selama 264,831, terjadi *overshoot* pada detik ke 289,543 sebesar 0,61 m, *settling time* selama 452,705 s dan *steady-state error* sebesar 0,07 m. Apabila dibandingkan dengan kendali PID, pada sistem kendali *heading*, kendali *fuzzy* memiliki *delay time* dan *rise time* yang lebih lama, namun tidak terjadi *overshoot*, sementara pada sistem kendali kedalaman, kendali *fuzzy* memiliki *delay time* yang lebih lambat namun *rise time* yang lebih cepat, *overshoot* yang terjadi dengan menggunakan kendali PID lebih besar dan *settling time* kendali PID lebih lama. Kendali *fuzzy* dapat dijadikan alternative pengganti kendali PID pada kapal selam.

Kata kunci : kapal selam, kendali *heading*, kendali kedalaman, kontrol logika *fuzzy*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Design of Submarine Heading and Depth Control System Using Fuzzy Logic Controller

Name of Student : Josua Joel Jireh Dededaka
NRP : 04211440000018
Department : Marine Engineering
Supervisor 1 : Ir. Agoes Achmad Masroeri, M. Eng., D. Eng
Supervisor 2 : Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T

Abstract

The main difference between a submarine and a surface ship is its ability to move in three dimensions, where the surface vessel can only move on a horizontal plane. When performing maneuvers below the water surface, a control system is required. Submarine maneuver control is done by adjusting the actuator angle of rudder and stern plane. Control methods commonly used are PID control methods (Proportional, Integral, and Derivative), therefore it requires a mathematical model with a high degree of accuracy or manual tuning performed by the user. The method of alternative control system used in this final project is fuzzy logic control. The advantage of fuzzy logic control lies in the simplicity and ability to work more flexibly in various conditions. The fuzzy logic control function in this design is to receive the input of yaw error and yaw rate and then produce the output of the rudder angle as the actuator, for the depth control system, the controller receive the input of depth error and heave rate then produce the output of the stern plane angle as the actuator, in accordance with the rules of fuzzy logic. The research begins with 3D modeling, followed by submarine mathematical modeling. Once the mathematical model is obtained, proceed with designing a fuzzy control system. In this research, the comparison between fuzzy control and PID control is done. Control system simulation is done in the form of simulation of heading control system and depth with constant setpoint and changing setpoint. In the simulation of heading control system with constant setpoint (30°) fuzzy control performs with delay time of 150,224 s, rise time and settling time of 650,191 s, with no overshoot and steady-state error. In simulation of depth control system with constant setpoint (50 m), fuzzy control performs with delay time of 123,762 s, rise time of 264,831, overshoot at 289,543 seconds for 0,61 m, settling time of 452,705 s and steady-state error of 0.07 m. Compared to PID control, for the heading control system, fuzzy control has longer delay time and rise time, but no overshoot, while for the depth control system, fuzzy control has a slower delay time but faster rise time, the overshoot occurs by using PID control is larger and PID control has longer settling time. Fuzzy control can be an alternative to PID control on submarines.

Keywords : submarine, heading control, depth control, fuzzy logic controller

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, yang telah memberikan rahmat, anugrah serta tuntunannya-Nya, sehingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“Perancangan Sistem Kendali *Heading* dan Kedalaman Kapal Selam dengan Menggunakan Kontrol Logika Fuzzy**” dengan baik dan tepat waktu. Dimana tugas akhir ini diajukan sebagai salah satu syarat kelulusan program studi sarjana di Departemen Teknik Sistem Perkapalan FTK-ITS.

Penulis menyadari, terselesaikannya Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan dari banyak pihak. Oleh karena itu penulis menyampaikan rasa terimakasih yang mendalam kepada pihak-pihak di bawah ini :

1. Kedua orang tua penulis, Bapak Freddy Dededaka dan Ibu Vinno Kumentas serta kakak Eunike Kartini yang terus memberikan dukungan dan menjadi penyemangat dalam penulis melakukan aktifitas selama perkuliahan dan penulisan tugas akhir ini.
2. Bapak Dr. Eng. Badrus Zaman, ST., MT selaku kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan yang sudah memberikan ilmu baik materi kuliah maupun diluar perkuliahan yang dapat menjadi pembelajaran bagi penulis.
3. Bapak Ir. Agoes Santoso, M.Sc. selaku dosen wali penulis yang telah membimbing penulis selama masa perkuliahan dan juga mempersiapkan penulis untuk menghadapi tantangan paska kampus.
4. Bapak Ir. Agoes Achmad Masroeri, M. Eng., D. Eng selaku dosen pembimbing pertama penulis yang senantiasa memberikan bimbingan dan memberikan ilmu pada saat proses penelitian.
5. Ibu Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T selaku dosen pembimbing kedua penulis yang turut membimbing penulis dan membagikan ilmu selama berjalannya proses penelitian.
6. Seluruh dosen, tenaga kependidikan serta manajemen Departemen Teknik Sistem Perkapalan FTK – ITS.
7. Seluruh keluarga MERCUSUAR '14 yang selalu mendukung dan membantu selama perkuliahan di Departemen Teknik Sistem Perkapalan.
8. Kepada pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu, terima kasih atas segala bantuan dan dukungan yang telah diberikan kepada penulis.

Penulis menyadari bahwa penelitian yang dilakukan dalam tugas akhir ini jauh dari sebuah kesempurnaan, oleh karenanya kritik dan saran sangat terbuka untuk membangun dan kebaikan bersama kedepannya.

Akhir kata, penulis berharap semoga apa yang tertulis dalam tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi penulis khususnya maupun pembaca pada umumnya.

Surabaya, Juli 2018
Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	v
KATA PENGANTAR.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Kapal Selam.....	3
2.2 Dinamika Kapal Selam	4
2.3 Pemodelan Dinamika Kapal Selam.....	6
2.4 Pemodelan Dinamika Aktuator	12
2.5 Sistem Kendali.....	12
2.6 Performansi Sistem Kendali	13
2.6 Sistem Kendali <i>Fuzzy</i>	14
2.6 Kendali PID (<i>Proportional, Integral, Derivative</i>).....	18
2.7 Metode Ziegler-Nichols	18
BAB III METODE PENELITIAN	21
3.1 Alur Penelitian.....	21
3.1 Pemodelan Tiga Dimensi Kapal Selam.....	22
3.2 Pemodelan Sistem Dinamik Kapal Selam.....	23
3.3 Perancangan Sistem Kendali.....	26
3.4 Pemodelan Aktuator	32
3.5 Pengujian Sistem Kendali Secara Simulasi.....	33
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	37
4.1 Umum.....	37
4.2 Analisis Simulasi <i>Open Loop</i> Sistem Kendali <i>Heading</i>	37
4.3 Analisis Simulasi <i>Open Loop</i> Sistem Kendali Kedalaman.....	38
4.4 Analisis Simulasi Sistem Kendali <i>Heading</i>	40
4.5 Analisis Simulasi Sistem Kendali Kedalaman	43
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	49
5.1 Kesimpulan.....	49
5.2 Saran.....	49
DAFTAR PUSTAKA	51
LAMPIRAN	
BIODATA PENULIS	

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Alur Sistem Kemudi Kapal Selam	3
Gambar 2.2	Sistem Kerangka Referensi Kapal Selam	5
Gambar 2.3	Tingkat stabilitas gerak (a) Tidak stabil (b) Stabilitas garis lurus (c) Stabilitas direksional (d) Stabilitas gerak posisional	6
Gambar 2.4	Diagram Control Loop Rudder.....	12
Gambar 2.5	Sistem kendali open loop (a) dan closed loop (b)	13
Gambar 2.6	Kurva Respon Menunjukkan	14
Gambar 2.7	Struktur Dasar Logika <i>Fuzzy</i>	15
Gambar 2.8	Perbandingan antara himpunan <i>fuzzy</i> dengan pembacaan <i>crisp</i> (a) dan himpunan <i>fuzzy</i> dengan pembacaan <i>fuzzy</i> (b)	16
Gambar 2.9	Pembagian Himpunan <i>Fuzzy</i>	16
Gambar 2.10	Respon Plant Terhadap Unit-Step	19
Gambar 2.11	Kurva-S Respon	19
Gambar 3.1	<i>Flowchart</i> Penelitian	21
Gambar 3.2	Menu Frame of Reference and Zero Point.....	22
Gambar 3.3	Model 3D Kapal Selam	23
Gambar 3.4	Diagram Blok Kendali Heading (a) dan Kedalaman (b) Kapal Selam	26
Gambar 3.5	Logika <i>Fuzzy</i> Sistem Kendali <i>Heading</i> Dengan Masukan <i>Error Yaw</i> dan <i>Yaw Rate</i> Serta Keluaran Sudut <i>Rudder</i>	27
Gambar 3.6	Logika <i>Fuzzy</i> Sistem Kendali Kedalaman Dengan Masukan <i>Error Kedalaman</i> dan <i>Heave Rate</i> Serta Keluaran Sudut <i>Stern Plane</i>	27
Gambar 3.7	Fungsi Keanggotaan <i>Error Yaw</i>	28
Gambar 3.8	Fungsi Keanggotaan <i>Error Kedalaman</i>	28
Gambar 3.9	Fungsi Keanggotaan <i>Yaw Rate</i>	29
Gambar 3.10	Fungsi Keanggotaan <i>Heave Rate</i>	29
Gambar 3.11	Fungsi Keanggotaan <i>Rudder</i>	30
Gambar 3.12	Fungsi Keanggotaan <i>Stern Plane</i>	31
Gambar 3.13	<i>Surface view rule base</i> KLF subsistem <i>heading</i>	32
Gambar 3.14	<i>Surface view rule base</i> KLF subsistem kedalaman.....	32
Gambar 3.15	Diagram Blok Aktuator (<i>Rudder</i> dan <i>Stern Plane</i>).....	33
Gambar 3.16	Diagram Uji <i>Open Loop</i> Subsistem <i>Heading</i>	33
Gambar 3.17	Diagram Uji <i>Open Loop</i> Subsistem Kedalaman.....	34
Gambar 3.18	Diagram Blok Uji <i>Closed Loop</i> Subsistem <i>Heading</i>	34
Gambar 3.19	Diagram Uji Blok <i>Closed Loop</i> Subsistem Kedalaman.....	35
Gambar 4.1	Rangkaian Diagram Blok <i>Open Loop</i> Sistem Kendali <i>Heading</i>	37
Gambar 4.2	Respon <i>Heading</i> pada Uji <i>Open Loop</i> dengan Masukan 20°	37
Gambar 4.3	Respon <i>Heading</i> pada Uji <i>Open Loop</i> dengan Masukan -20°	38
Gambar 4.4	Rangkaian Diagram Blok <i>Open Loop</i> Sistem Kendali Kedalaman	38
Gambar 4.5	Respon Kedalaman pada Uji <i>Open Loop</i> dengan Masukan 20°	39
Gambar 4.6	Respon Kedalaman pada Uji <i>Open Loop</i> dengan Masukan -20°	39
Gambar 4.7	Rangkaian Diagram Blok Uji <i>Closed Loop</i> Sistem Kendali <i>Heading</i>	40
Gambar 4.8	Respon <i>Heading</i> pada Uji <i>Closed Loop</i> Kendali Logika <i>Fuzzy</i> dengan <i>Setpoint</i> 30°	40

Gambar 4.9	Perbandingan Respon Heading pada Uji Closed Loop kendali <i>Fuzzy</i> (Biru) dan kendali PID (Merah) dengan setpoint 30°	41
Gambar 4.10	Respon <i>Heading</i> Pada Uji <i>Closed Loop</i> Kendali <i>Fuzzy</i> dengan perubahan <i>setpoint</i>	42
Gambar 4.11	Perbandingan Respon <i>Heading</i> pada Uji <i>Closed Loop</i> kendali <i>Fuzzy</i> (Biru) dan kendali PID (Merah) dengan perubahan <i>setpoint</i>	42
Gambar 4.12	Rangkaian Diagram Blok Uji <i>Closed Loop</i> Sistem Kendali Kedalaman	43
Gambar 4.13	Respon Kendali <i>Fuzzy</i> pada Uji Kendali Kedalaman dengan <i>Setpoint</i> 50 m	44
Gambar 4.14	Perbandingan Respon Kendali <i>Fuzzy</i> (Biru) dan Kendali PID (Merah) pada Uji Kendali Kedalaman dengan <i>Setpoint</i> 50 m	44
Gambar 4.15	Respon Kendali <i>Fuzzy</i> pada Uji Kendali Kedalaman dengan <i>Setpoint</i> Berubah	46
Gambar 4.16	Perbandingan Respon Kendali <i>Fuzzy</i> (Biru) dan kendali PID (Merah) pada Uji Kendali Kedalaman dengan <i>Setpoint</i> Berubah	46

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Spesifikasi Kapal Selam	4
Tabel 2.2 Notasi SNAME (Fossen, 1994)	4
Tabel 2.3 Aturan Tuning Ziegler-Nichols Berdasarkan Respon Unit-Step Dari Plant ..	19
Tabel 3.1 Spesifikasi Kapal Selam Mini	22
Tabel 3.2 Parameter Perhitungan Hidrodinamika	23
Tabel 3.3 Koefisien Hidrodinamika Subsistem Heading	24
Tabel 3.4 Koefisien Hidrodinamika Subsistem Kedalaman	24
Tabel 3.5 Rentang Fungsi Keanggotaan <i>Error Yaw</i>	28
Tabel 3.6 Rentang Fungsi Keanggotaan <i>Error Kedalaman</i>	28
Tabel 3.7 Rentang Fungsi Keanggotaan <i>Yaw Rate</i>	29
Tabel 3.8 Rentang Fungsi Keanggotaan <i>Heave Rate</i>	30
Tabel 3.9 Rentang Fungsi Keanggotaan <i>Rudder</i>	30
Tabel 3.10 Rentang Fungsi Keanggotaan <i>Stern Plane</i>	31
Tabel 3.11 <i>Rule Base</i> Pengendalian KLF pada <i>Rudder</i> (Subsistem <i>Heading</i>)	31
Tabel 3.12 <i>Rule Base</i> Pengendalian KLF pada <i>Stern Plane</i> (Subsistem <i>Kedalaman</i>) ...	32
Tabel 4.1 Performansi Kendali <i>Fuzzy</i> dan Kendali PID dengan <i>Setpoint Heading</i> 30°.	41
Tabel 4.2 Performansi Kendali <i>Fuzzy</i> dan Kendali PID dengan Perubahan <i>Setpoint Heading</i>	42
Tabel 4.3 Performansi Kendali <i>Fuzzy</i> dan Kendali PID dengan <i>Setpoint Kedalaman</i> 50 m	45
Tabel 4.4 Performansi Kendali <i>Fuzzy</i> dan Kendali PID dengan Perubahan <i>Setpoint</i>	46

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kapal selam beroperasi di bawah permukaan air laut, umumnya untuk tujuan militer, baik dalam misi pengintaian, patroli atau untuk menyerang kapal lainnya. Kapal selam melakukan manuver secara tiga dimensi, sedangkan kapal permukaan hanya dapat bergerak secara dua dimensi pada bidang datar. Kemampuan kapal selam untuk bergerak di bawah permukaan air laut memberikan keunggulan taktis bagi kapal selam, yaitu dapat bergerak dan menyerang tanpa terdeteksi. Kapal selam mini dalam hal ini memiliki keunggulan untuk beroperasi di wilayah Indonesia yang memiliki perairan tergolong dangkal, sehingga tidak efektif untuk pengoperasian kapal selam besar. Dikarenakan aplikasinya dalam bidang militer, maka teknologi kapal selam umumnya dirahasiakan dan penelitian yang dipublikasikan masih terbatas.

Ketika beroperasi di bawah permukaan air laut, kapal selam tidak terus menerus berada pada kedalaman yang sama, kapal selam memiliki tiga mode operasi, yaitu operasi permukaan (*surface*), *snorkelling*, dan *silent run*. Ketika beroperasi di permukaan maka gerak kapal selam sama dengan gerak kapal permukaan pada umumnya. Mode *snorkelling* adalah mode operasi dimana badan kapal selam berada di bawah permukaan air laut, namun dengan kedalaman yang masih memungkinkan udara untuk masuk melalui saluran *snorkel* sehingga dapat menjalankan mesin diesel. Ketika beroperasi pada mode *silent run*, kapal selam berada sepenuhnya dibawah permukaan air dan menjalankan sistem propulsi dengan tenaga listrik, kapal selam beroperasi pada kecepatan dan tingkat aktivitas yang rendah untuk menghindari deteksi dari sonar kapal permukaan.

Dalam melakukan manuver di bawah permukaan air, dibutuhkan sebuah sistem kendali. Kendali manuver kapal selam dilakukan dengan mengatur sudut aktuator berupa *rudder* dan *stern plane*. Sistem kendali otomatis (*Autopilot*) bertujuan untuk memudahkan kerja operator kapal selam, yaitu dengan menjaga arah dan kedalaman kapal selam secara otomatis tanpa perlu penanganan manual dari operator, hal tersebut sangat membantu operator kapal selam, khususnya untuk operasi misi dan patroli jangka panjang sehingga dapat meminimalisir risiko terjadinya kesalahan atau kecelakaan yang diakibatkan oleh *human error*.

Metode kontrol yang umum dipakai adalah metode kontrol PID (*Proportional, Integral, and Derivative*) karena keandalan dan biaya yang rendah, walaupun memiliki beberapa kelemahan yaitu keharusan untuk '*user adjustment*' atau penyesuaian pengguna berupa *tuning* untuk mengakomodasi perubahan pembebanan pada kapal ketika beroperasi. Salah satu solusi yang diusulkan untuk menjawab permasalahan tersebut adalah dengan mempertimbangkan penggunaan kontrol intelijen seperti logika *fuzzy* dan *artificial neural network* yang dapat diimplementasikan ke dalam teknologi autopilot kapal. Logika *fuzzy* menjadi salah satu kandidat yang cocok dikarenakan kemampuannya untuk mereplikasi juru mudi yang berpengalaman, sehingga dapat menghasilkan autopilot yang stabil dan non-linier.

Salah satu kelebihan utama dari kendali logika *fuzzy* adalah aturan yang dapat diformulasi tanpa definisi yang presisi dari dinamika kapal. Aksi kendali umumnya ditentukan dengan upaya agar aksi aktuator ditentukan dari pengetahuan mengenai

ekspektasi dari respon kapal terhadap input. Meskipun proses ini sebaiknya dicapai melalui proses konsultasi dengan juru mudi atau observasi, aturan *fuzzy* juga dapat diformulasikan berdasarkan pemahaman akan dinamika kapal. Proses ini menggambarkan perbedaan mendasar kendali logika *fuzzy* dan kontroler berbasis model yang lebih tradisional. Kontroler berbasis model lebih memperhatikan spesifikasi performa seperti *damping*, kecepatan respon, *steady-state error*, dan sebagainya, kendali *fuzzy* lebih focus dalam memprediksi respon sistem terhadap input tertentu.

1.2 Perumusan Masalah

Agar proses penelitian dapat berjalan dengan lancar, maka perlu diketahui masalah-masalah yang timbul saat proses pengerjaan penelitian, yaitu :

1. Bagaimana rancangan sistem kendali *fuzzy* yang sesuai untuk mengendalikan *heading* dan kedalaman kapal selam dengan menggerakkan *rudder* dan *stern plane*?

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian dapat berjalan dengan efektif dan tujuan tercapai maka diperlukan adanya pembatasan permasalahan, diantaranya adalah :

1. Sistem kendali berfokus untuk menjaga *heading* (*course-keeping*) dan kedalaman pada nilai yang diinginkan.
2. Kapal selam menggunakan *rudder* dan *stern plane* dengan konfigurasi *cruciform* (+).
3. Variabel yang dikendalikan berupa dua derajat kebebasan yaitu gerak rotasi pada sumbu y (*pitch*) dan sumbu z (*yaw*).
4. Metode inferensi yang digunakan pada perancangan sistem kendali adalah metode kontrol logika *fuzzy* tipe Mamdani.

1.4 Tujuan Penelitian

Dari perumusan masalah diatas maka dapat ditentukan tujuan dari Tugas Akhir ini, yaitu :

1. Untuk merancang sistem kendali *fuzzy* yang sesuai untuk mengendalikan *heading* dan kedalaman kapal selam dengan menggunakan *rudder* dan *stern plane*.

1.5 Manfaat

Manfaat dari penelitian yang akan dilakukan adalah :

1. Menghasilkan simulasi sistem kendali *heading* dan kedalaman dengan menggunakan kontrol logika *fuzzy*, yang dapat dikembangkan lebih lanjut dalam bentuk prototipe perangkat keras.

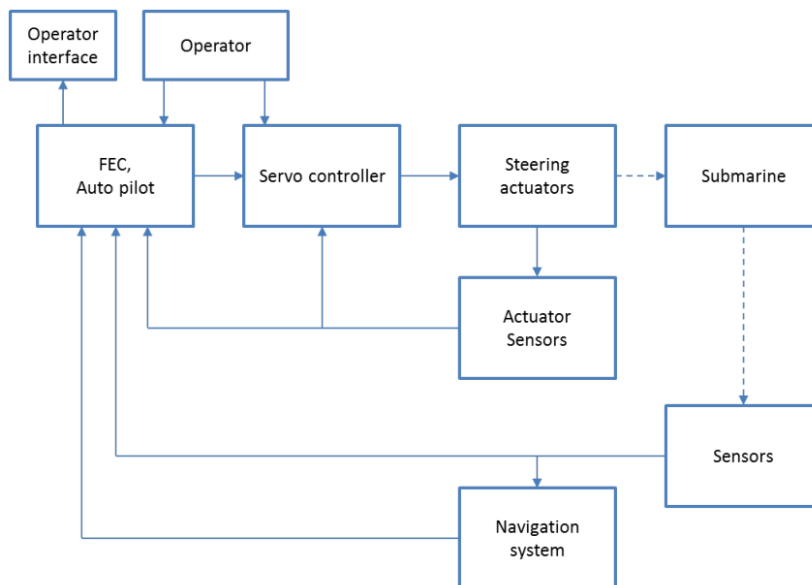
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kapal Selam

Kapal selam adalah wahana dengan propulsi mandiri yang mampu membawa personil ketika beroperasi di permukaan ataupun di bawah permukaan air laut, dimana tekanan internal kapal selam normalnya dijaga pada tekanan satu atmosfer (ABS, 2016). Kapal selam umum dipakai dalam operasi militer untuk menyerang kapal permukaan atau kapal selam lainnya, selain itu saat ini kapal selam juga dijadikan sebagai peluncur misil. Sifat kapal selam yang sulit dideteksi keberadaannya dimanfaatkan untuk misi pengawasan dan pengintaian.

Kapal selam tersusun dari badan silindris dengan ujung belakang yang mengecil (berbentuk konis), dan struktur vertical yang disebut sail pada bagian *amidship* dimana terdapat peralatan komunikasi dan navigasi misalnya periskop. Pada bagian belakang terdapat propeller dan permukaan kendali (*control surface*) berupa *rudder* (vertikal) dan *stern plane* (horizontal).



Gambar 2.1 Alur Sistem Kemudi Kapal Selam
Sumber: Lind, 2014

Gambar 2.1 menunjukkan struktur sederhana dari sistem kemudi kapal selam dan integrase dengan bagian lainnya. Pada gambar 2.1 operator dapat memilih antara *autopilot* atau kemudi manual. Pada kondisi kemudi manual, operator dapat menggunakan *joystick* atau roda kemudi untuk mengendalikan *servo controller*. Untuk mengemudi, operator membutuhkan informasi bacaan sensor yang ditampilkan pada *operator interface*.

Dalam melakukan manuver, kapal selam menggunakan beberapa jenis actuator yaitu, *propeller*, tangki, dan *hydroplane*. Sama seperti kapal permukaan, *propeller*

berfungsi untuk memberi gaya dorong pada kapal selam dan mengatur kecepatan. Tangki berupa *ballast tank*, *compensation tank*, dan *trim tank* bertujuan untuk mengendalikan kapal selam secara hidrostatik sehingga kapal selam mencapai kondisi *neutrally buoyant*, yaitu kondisi dimana besar gaya berat mendekati besar gaya apung. *Hydroplane* adalah permukaan kendali kapal selam yang bekerja dengan menghasilkan momen putar pada badan kapal selam, *hydroplane* terdiri dari *rudder* (vertikal) dan *stern plane* (horizontal). Pada penelitian ini actuator yang digunakan adalah *hydroplane* (*rudder* dan *stern plane*)

Spesifikasi utama dari kapal selam yang dijadikan objek perancangan sistem kendali dapat dilihat pada tabel 2.1

Tabel 2.1 Spesifikasi Kapal Selam

Spesifikasi	Nilai	
Panjang	32	m
Diameter	3,5	m
Tinggi	4	m
Kecepatan Maksimum	15	knot
<i>Silent Run</i>	4	knot
Kedalaman Maksimum	200	m
Kedalaman Snorkling	10	m

2.2 Dinamika Kapal Selam

Kapal selam dan kapal permukaan memiliki konsep dasar manuver yang serupa. Baik kapal selam maupun kapal permukaan dapat melakukan manuver pada bidang horizontal, namun yang membedakan kapal selam adalah kemampuan untuk melakukan manuver pada bidang vertikal, oleh karena itu kapal selam dikatakan dapat melakukan manuver pada enam derajat kebebasan.

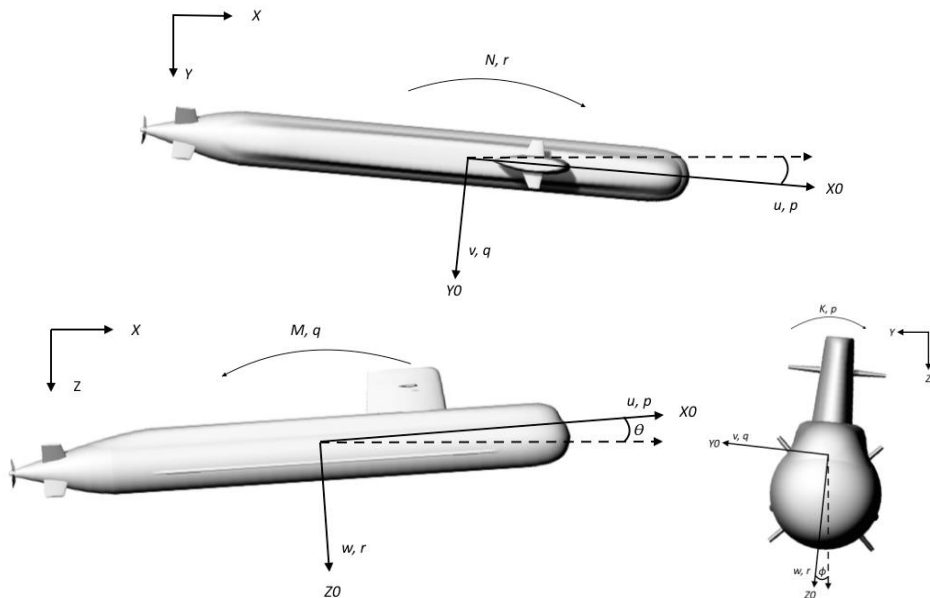
Persamaan gerak dan manuver kapal selam sama seperti pada kapal permukaan, hanya saja meliputi keenam derajat kebebasan. Notasi keenam derajat kebebasan sesuai standar yang ditetapkan SNAME (*Society of Naval Architect and Marine Engineers*), dijabarkan pada tabel.

Tabel 2.2 Notasi SNAME (Fossen, 1994)

DOF	Momen dan Gaya	Kecepatan Linear dan Sudut	Posisi dan Sudut Euler
1 Gerakan dalam arah x (<i>surge</i>)	X	u	x
2 Gerakan dalam arah y (<i>sway</i>)	Y	v	y
3 Gerakan dalam arah z (<i>heave</i>)	Z	w	z
4 Rotasi terhadap sumbu x (<i>roll</i>)	K	p	ϕ
5 Rotasi terhadap sumbu y (<i>pitch</i>)	M	q	θ
6 Rotasi terhadap sumbu z (<i>yaw</i>)	N	r	ψ

Ilustrasi dari notasi yang dijabarkan pada tabel 2.2 dapat dilihat pada gambar 2.2. Gambar 2.2 juga menjelaskan aturan lambang dan kerangka referensi yang digunakan secara konsisten dalam perhitungan. Secara umum, kerangka referensi terbagi menjadi

kerangka *body-fixed* dan *earth-fixed*. Pada sistem kerangka bergerak *body-fixed*, kerangka koordinat $X_0Y_0Z_0$ terletak pada badan kapal dengan titik *origin* terletak pada titik berat (CG) kapal tersebut. Sementara sistem koordinat pada kerangka *earth-fixed* terletak di titik inersial tertentu di luar badan kapal. Manuver dari kapal didefinisikan sebagai gerakan dari sistem kerangka *body-fixed* relative terhadap sistem kerangka *earth-fixed*, dengan demikian posisi dan orientasi kapal dideskripsikan relatif terhadap kerangka inersial sementara kecepatan linier dan anguler dijelaskan dengan sistem kerangka *body-fixed*.



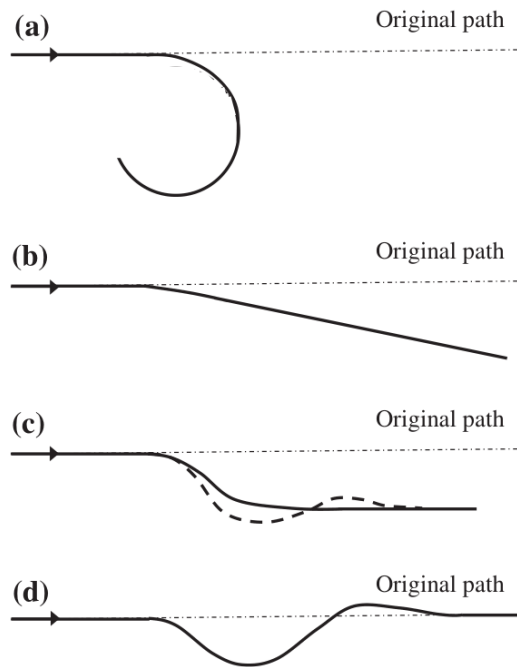
Gambar 2.2 Sistem Kerangka Referensi Kapal Selam

Sumber : Thune, 2015

Sama seperti dengan kapal permukaan, dalam melakukan manuver pada bidang horizontal terdapat empat tingkat stabilitas gerak, yaitu:

- Tidak stabil (*unstable*), yaitu kapal sama sekali tidak dapat mempertahankan arahnya.
- Stabilitas garis lurus (*straight line stability*), yaitu kapal tetap bergerak lurus namun dengan arah yang berbeda apabila terkena gangguan.
- Stabilitas direksional (*directional stability*), yaitu kapal tetap mempertahankan arah haluan yang tetap, namun berada pada jalur yang berbeda.
- Stabilitas gerak posisional (*positional motion stability*), yaitu kapal tetap berada pada arah haluan dan jalur yang sama.

Ilustrasi stabilitas gerak dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Tingkat stabilitas gerak (a) Tidak stabil (b) Stabilitas garis lurus (c) Stabilitas direksional (d) Stabilitas gerak posisional
 Sumber : Renilson, 2015

2.3 Pemodelan Dinamika Kapal Selam

Persamaan bentuk umum untuk manuver kapal pada enam derajat kebebasan dinyatakan oleh persamaan 2.1:

$$M\dot{v} + Dv = \tau \quad (2.1)$$

Dimana:

- | | |
|--------|-------------------|
| M | = Matriks inersia |
| $D(v)$ | = Matriks redaman |
| τ | = Input kontrol |

Persamaan gerak dari keenam derajat kebebasan untuk kapal selam dapat dibagi menjadi tiga subsistem terpisah yang tidak saling berinteraksi (tidak memiliki pengaruh yang signifikan), ketiga subsistem tersebut adalah subsistem kendali kecepatan, kendali arah, dan kendali kedalaman. Pendekatan ini dilakukan dengan mengabaikan mode *roll*. Variable state pada tiap subsistem adalah:

- Subsistem kecepatan : $u(t)$
- Subsistem arah (*heading*) : $v(t)$, $r(t)$, dan $\psi(t)$
- Subsistem kedalaman : $w(t)$, $q(t)$, $\theta(t)$, dan $z(t)$

Persamaan gerak untuk sistem kendali *heading* dinyatakan dalam persamaan matriks 2.2 (Fossen, 1994).

$$\begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -Y_v & mu_0 - Y_r & 0 \\ -N_v & mx_G u_0 - N_r & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{\delta} \\ N_{\delta} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_R \quad (2.2)$$

Persamaan 2.2 kemudian disusun ulang ke dalam bentuk state-space, dimana:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}\delta_R \quad (2.3)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{c}^T \mathbf{x} \quad (2.4)$$

Dimana,

$$\mathbf{x} = [v \quad r \quad \psi]^T \quad (2.5)$$

$$\mathbf{y} = \psi \quad (2.6)$$

Bentuk state-space dari persamaan 2.2 diperoleh dengan operasi matriks yang ditunjukkan pada persamaan 2.7.

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Y_{\delta} \\ N_{\delta} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_R \quad (2.7)$$

Parameter-parameter dalam persamaan 2.7 memiliki definisi sebagai berikut:

m = massa kapal selam

u_0 = kecepatan kapal selam

x_G = letak titik berat pada sumbu x

$Y_{\dot{v}}$ = turunan gaya *sway* terhadap \dot{v}

$Y_{\dot{r}}$ = turunan gaya *sway* terhadap \dot{r}

$N_{\dot{v}}$ = turunan momen *yaw* terhadap \dot{v}

$N_{\dot{r}}$ = turunan momen *yaw* terhadap \dot{r}

I_z = momen inersia terhadap sumbu z

Y_v = turunan gaya *sway* terhadap v

Y_r = turunan gaya *sway* terhadap r

N_v = turunan momen *yaw* terhadap v

N_r = turunan momen *yaw* terhadap r

Y_{δ} = turunan gaya *sway* terhadap sudut *rudder*

N_{δ} = turunan momen *yaw* terhadap sudut *rudder*

\dot{v} = turunan kecepatan *sway* terhadap waktu

\dot{r} = turunan kecepatan sudut *yaw* terhadap waktu

$\dot{\psi}$ = turunan sudut *heading* terhadap waktu

v = kecepatan *sway*

r = kecepatan sudut *yaw*

ψ = sudut *heading*

δ_R = sudut defleksi *rudder*

Persamaan gerak untuk sistem kendali kedalaman dinyatakan dalam persamaan matriks 2.8 (Fossen, 1994).

$$\begin{bmatrix} m - Z_{\dot{w}} & mx_G - Z_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ mx_G - M_{\dot{w}} & I_y - M_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -Z_w & mu_0 - Z_q & 0 & 0 \\ -M_w & mx_G u_0 - M_q & \overline{BG}_z W & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & u_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_\delta \\ M_\delta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_S \quad (2.8)$$

Bentuk state-space persamaan 2.8 dapat dinyatakan dengan memilih $y = z$, sehingga menjadi:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}\delta_S \quad (2.9)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{c}^T \mathbf{x} \quad (2.10)$$

Dimana,

$$\mathbf{c}^T = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1] \quad (2.11)$$

Bentuk state-space dari persamaan 2.8 diperoleh dengan operasi matriks yang ditunjukkan pada persamaan 2.12.

$$\begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m - Z_{\dot{w}} & mx_G - Z_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ mx_G - M_{\dot{w}} & I_y - M_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m - Z_{\dot{w}} & mx_G - Z_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ mx_G - M_{\dot{w}} & I_y - M_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z_\delta \\ M_\delta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_S \quad (2.12)$$

Parameter-parameter dalam persamaan 2.8 memiliki definisi sebagai berikut:

m = massa kapal selam

u_0 = kecepatan kapal selam

x_G = letak titik berat pada sumbu x

$Z_{\dot{w}}$ = turunan gaya *heave* terhadap \dot{w}

$Z_{\dot{q}}$ = turunan gaya *heave* terhadap \dot{q}

$M_{\dot{w}}$ = turunan momen *pitch* terhadap \dot{w}

$M_{\dot{q}}$ = turunan momen *pitch* terhadap \dot{q}

I_y = momen inersia terhadap sumbu y

Z_w	= turunan gaya <i>heave</i> terhadap w
Z_q	= turunan gaya <i>heave</i> terhadap q
M_w	= turunan momen <i>pitch</i> terhadap w
M_q	= turunan momen <i>pitch</i> terhadap q
\overline{BG}_Z	= jarak vertical antara titik apung dan titing berat ($\overline{BG}_Z = z_G - z_B$)
W	= berat kapal selam
Z_δ	= turunan gaya <i>heave</i> terhadap sudut <i>stern plane</i>
M_δ	= turunan momen <i>pitch</i> terhadap sudut <i>stern plane</i>
\dot{w}	= turunan kecepatan <i>heave</i> terhadap waktu
\dot{q}	= turunan kecepatan sudut <i>pitch</i> terhadap waktu
$\dot{\theta}$	= turunan sudut <i>pitch</i> terhadap waktu
\dot{z}	= turunan jarak arah sumbu z (kedalaman) terhadap waktu
w	= kecepatan <i>heave</i>
q	= kecepatan sudut <i>pitch</i>
θ	= sudut <i>pitch</i>
z	= jarak arah sumbu z (kedalaman)
δ_S	= sudut defleksi <i>stern plane</i>

Nilai koefisien hidrodinamika pada persamaan subsistem *heading* dan subsistem kedalaman diperoleh dengan melakukan pendekatan rumus empiris (Renilson, 2015). Perhitungan koefisien hidrodinamika terbagi menjadi perhitungan untuk lambung (*hull*), anggota badan (*appendage*) dan permukaan kendali (*control surface*). Koefisien hidrodinamika yang dinyatakan dalam bentuk non-dimensional dinormalisasikan sesuai dengan sistem *Prime I* (Fossen, 1994). Faktor pengali sistem *Prime I* berdasarkan jenis besarnya adalah $\frac{1}{2} \rho U^2 L^2$ untuk besaran gaya dan $\frac{1}{2} \rho U^2 L^3$ untuk besaran momen, dimana ρ adalah massa jenis air laut (1025 kg/m^3), U adalah kecepatan kapal, dan L adalah panjang kapal.

Koefisien hidrodinamika untuk *hull* diperoleh berdasarkan persamaan 2.11 sampai dengan 2.28.

$$Y'_v = Z'_w \quad (2.11)$$

$$Z'_w = \left[0.5 \left(\frac{L}{D} \right) - 11 \right] \times 10^{-3} \quad (2.12)$$

$$Y'_r = Z'_q = 0 \quad (2.13)$$

$$N'_r = M'_q = 0 \quad (2.14)$$

$$N'_v = -M'_w \quad (2.15)$$

$$N'_v = (k_y + k_x) m' \quad (2.16)$$

$$M'_w = \left[-\left(\frac{L}{D}\right) + 20 \right] 10^{-3} \quad (2.17)$$

$$Y'_{\dot{v}} = -k_y m' \quad (2.18)$$

$$Z'_{\dot{w}} = -k_z m' \quad (2.19)$$

$$Y'_{\dot{r}} = N'_{\dot{v}} = 0 \quad (2.20)$$

$$Z'_{\dot{q}} = M'_{\dot{w}} = 0 \quad (2.21)$$

$$N'_{\dot{r}} = -k_z I'_{zz} \quad (2.22)$$

$$M'_{\dot{q}} = -k_y I'_{yy} \quad (2.23)$$

$$I_{yy} = I_{zz} = \frac{\pi \rho}{30} L \bar{d}^4 \left(\left(\frac{L}{\bar{d}}\right)^2 + 1 \right) \quad (2.24)$$

Dimana,

$$k_x = -0.00047 \left(\frac{L}{\bar{d}}\right)^2 + 0.0134 \left(\frac{L}{\bar{d}}\right) - 0.059 \quad (2.25)$$

$$k_y = k_z = -0.00088 \left(\frac{L}{\bar{d}}\right)^2 + 0.0245 \left(\frac{L}{\bar{d}}\right) + 0.805 \quad (2.26)$$

$$m' = \frac{\Delta}{\frac{1}{2}\rho L^3} \quad (2.27)$$

$$\bar{d} = \left(\frac{6\Delta}{\pi \rho L} \right)^{0.5} \quad (2.28)$$

Koefisien hidrodinamika untuk bagian *appendages* kapal selam diperoleh berdasarkan persamaan 2.29 sampai dengan 2.45.

$$Y_{v_{app}} = -\frac{1}{2}\rho V S_a (C_{L\alpha} + C_D) \quad (2.29)$$

$$Z_{w_{app}} = -\frac{1}{2}\rho V S_a (C_{L\alpha} + C_D) \quad (2.30)$$

$$N_{v_{app}} = l_{app} \times Y_{v_{app}} \quad (2.31)$$

$$M_{w_{app}} = -l_{app} \times Z_{w_{app}} \quad (2.32)$$

$$Y_{r_{app}} = l_{app} \times Y_{v_{app}} \quad (2.33)$$

$$Z_{qapp} = l_{app} \times Z_{wapp} \quad (2.34)$$

$$N_{rapp} = l_{app}^2 \times Y_{vapp} \quad (2.35)$$

$$M_{qapp} = l_{app}^2 \times Z_{wapp} \quad (2.36)$$

$$Y'_{\dot{v}app} = -\frac{m_{added}}{\frac{1}{2}\rho L^3} \quad (2.37)$$

$$Z'_{\dot{w}app} = -\frac{m_{added}}{\frac{1}{2}\rho L^3} \quad (2.38)$$

$$N'_{\dot{v}app} = -\frac{l_{app} \times Y'_{\dot{v}app}}{L} \quad (2.39)$$

$$M'_{\dot{w}app} = -\frac{l_{app} \times Z'_{\dot{w}app}}{L} \quad (2.40)$$

$$Y'_{\dot{r}app} = -\frac{l_{app} \times Y'_{\dot{v}app}}{L} \quad (2.41)$$

$$Z'_{\dot{q}app} = -\frac{l_{app} \times Z'_{\dot{w}app}}{L} \quad (2.42)$$

$$N'_{\dot{r}app} = \frac{l_{app}^2 \times Y'_{\dot{v}app}}{L^2} \quad (2.43)$$

$$M'_{\dot{q}app} = \frac{l_{app}^2 \times Z'_{\dot{w}app}}{L^2} \quad (2.44)$$

$$m_{added} = \pi K_a \rho \frac{a^2}{4} b \quad (2.45)$$

Koefisien hidrodinamika untuk *control surface* kapal selam diperoleh berdasarkan persamaan 2.46 sampai dengan 2.49.

$$Y_{\delta R} = \frac{1}{2} \rho V_R C_{L\delta R} \quad (2.46)$$

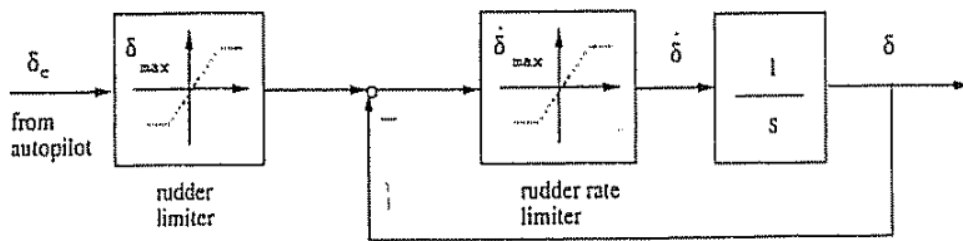
$$N_{\delta R} = \frac{1}{2} \rho V_R x_{rudder} C_{L\delta R} \quad (2.47)$$

$$Z_{\delta S} = -\frac{1}{2} \rho V_S C_{L\delta S} \quad (2.48)$$

$$M_{\delta S} = \frac{1}{2} \rho V_S x_{stern} C_{L\delta S} \quad (2.49)$$

2.4 Pemodelan Dinamika Aktuator

Permukaan kendali pada kapal selam terdiri atas *rudder* dan *stern plane*. *Rudder* berfungsi untuk mengatur arah kapal selam pada bidang horizontal dengan menghasilkan momen *yaw*, sementara *stern plane* mengatur arah kapal selam pada bidang vertikal dengan menghasilkan momen *pitch*. Model kemudi yang umum digunakan dalam perancangan sistem kendali adalah tipe Van Amerongen. *Rudder* dan *stern plane* memiliki batasan sudut dari -35° hingga 35° dengan laju kerja antara 2,3°/s hingga 7°/s. Gambar 2.4 merupakan diagram blok untuk mensimulasikan dinamika dari *rudder* Van Amerongen.



Gambar 2.4 Diagram Control Loop Rudder
Sumber: Fossen, 1994

Gambar 2.4 menunjukkan diagram untuk mensimulasikan *rudder* Van Amerongen pada uji simulasi sistem kendali *heading* dan kedalaman menggunakan *software* simulasi sistem kendali. Masukan untuk permukaan kendali berupa *command angle* (δ_c). Kemudian terdapat *function block saturation* yang berfungsi sebagai pembatas untuk *range* keluaran dari *rudder*. Keluaran dari diagram blok berupa sudut defleksi *rudder* (δ). Persamaan yang menyatakan diagram blok pada gambar 2.4 dapat dilihat pada persamaan.

$$\delta = \frac{K}{\sigma s + 1} \quad (2.50)$$

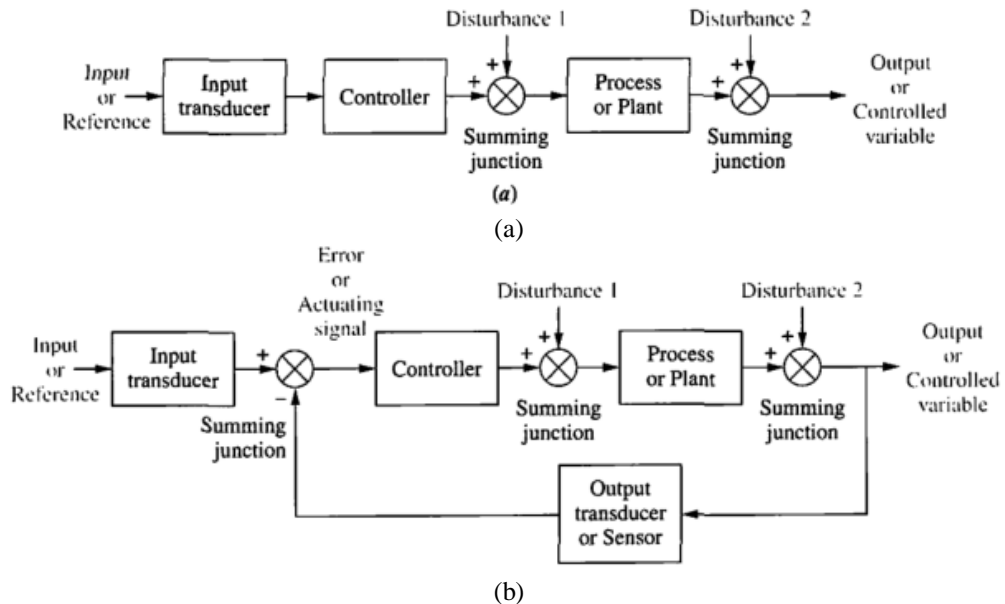
Dengan nilai K adalah penguat sebagai nilai hasil dari $\Delta O / \Delta I$ dan σs adalah *time constant* (Fossen, 1994).

2.5 Sistem Kendali

Sistem kendali adalah suatu susunan komponen fisik yang terhubung atau terkait sedemikian rupa sehingga dapat memerintah, mengarahkan, atau mengatur diri sendiri atau sistem lain. Sistem kendali terdiri dari subsistem dan proses (*plant*) yang disusun dengan tujuan untuk memperoleh output dan performa yang diinginkan, sesuai dengan input yang diberikan.

Gambar 2.5 menunjukkan dua jenis sistem kendali, yaitu sistem kendali *open loop* dan sistem kendali *closed loop*. Pada sistem kendali *open loop*, transduser input meneruskan sinyal kendali menuju kontroler, plant, dan kemudian dihasilkan sebuah output tanpa adanya perbandingan kembali dengan input referensi. Sementara, pada sistem kendali *closed loop*, terdapat sensor yang berfungsi untuk mengukur output kemudian meneruskannya kepada kontroler yang mengendalikan aktuator, sehingga pada

sistem kendali *closed loop* atau *feedback control*, dapat dilakukan kompensasi apabila terjadi gangguan terhadap subsistem atau plant sesuai dengan nilai error yang merupakan perbedaan antara input yang diberikan dan hasil pengukuran sensor.



Gambar 2.5 Sistem kendali open loop (a) dan closed loop (b)

Sumber : Nise, 2011

2.6 Performansi Sistem Kendali

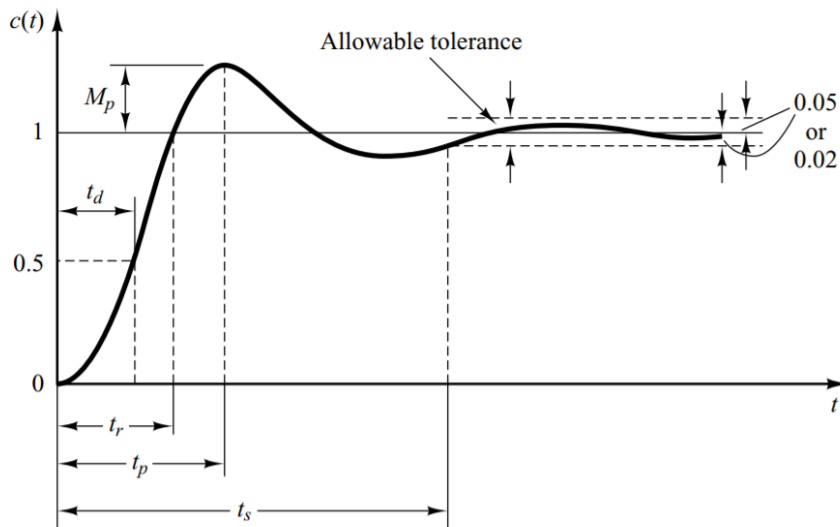
Pada umumnya, karakteristik performansi dari sebuah sistem pengendalian dinilai berdasarkan respon transien dari *plant* yang dikendalikan terhadap *setpoint* yang diberikan. Aspek-aspek performansi dari respon transien dijelaskan sebagai berikut:

1. *Delay time* (t_d) adalah waktu yang dibutuhkan bagi respon untuk mencapai setengah dari nilai *setpoint* untuk pertama kalinya.
2. *Rise time* (t_r) adalah waktu yang dibutuhkan respon dari 10% hingga 90%, 5% hingga 95%, atau dari 0% hingga 100% dari nilai *setpoint*.
3. *Peak time* (t_p) adalah waktu yang dibutuhkan respon untuk mencapai puncak pertama dari *overshoot*.
4. *Maximum Percent Overshoot* (M_p) adalah nilai puncak maksimum dari kurva respon diukur dari nilai *setpoint*. Nilai dari *maximum (percent) overshoot* secara langsung menunjukkan tingkat kestabilan dari sistem. Apabila nilai final *steady-state* berbeda dengan nilai *setpoint* maka biasanya *maximum percent overshoot* didefinisikan dengan persamaan 2.40.

$$\text{Maximum percent overshoot} = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% \quad (2.51)$$

5. *Settling time (t_s)* *Settling time* adalah waktu yang dibutuhkan untuk kurva respon mencapai dan menetap pada nilai *setpoint* sesuai dengan besar toleransi yang ditetapkan (umumnya antara 2% sampai 5% dari nilai *setpoint*).

Spesifikasi peromansi respon sistem pengendalian ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Kurva Respon Menunjukkan t_d , t_r , t_p , M_p , dan t_s

Sumber: Ogata, 2010

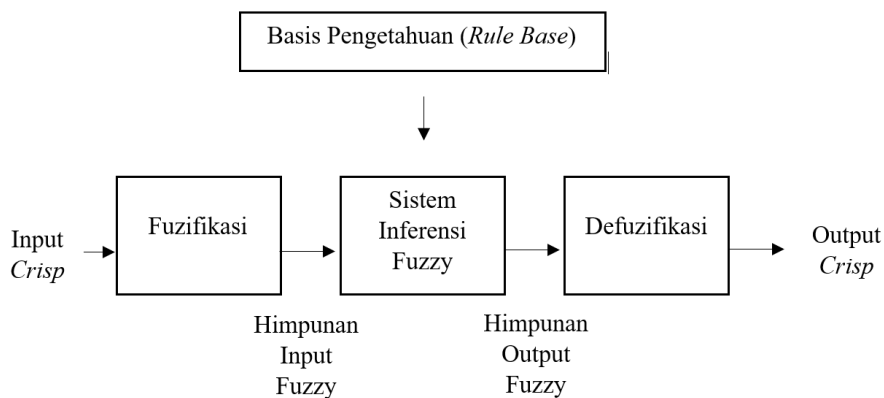
2.6 Sistem Kendali Fuzzy

Sistem *fuzzy* pertama kali diperkenalkan oleh Prof. L. A. Zadeh pada tahun 1965. Sistem *fuzzy* merupakan penduga numerik yang terstruktur dan dinamis. Sistem ini mempunyai kemampuan untuk mengembangkan sistem intelijen dalam lingkungan yang tak pasti. Sistem ini menduga suatu fungsi dengan logika *fuzzy*. Dalam logika *fuzzy* terdapat beberapa proses yaitu penentuan himpunan *fuzzy*, penerapan aturan IF-THEN dan proses inferensi *fuzzy*. Sistem *fuzzy* mempunyai beberapa keuntungan bila dibandingkan dengan sistem tradisional, misalkan pada jumlah aturan yang dipergunakan. Pemrosesan awal sejumlah besar nilai menjadi sebuah nilai derajat keanggotaan pada sistem *fuzzy* mengurangi jumlah nilai menjadi sebuah nilai derajat keanggotaan pada sistem *fuzzy* mengurangi jumlah nilai yang harus dipergunakan pengontrol untuk membuat suatu keputusan. Keuntungan lainnya adalah sistem *fuzzy* mempunyai kemampuan penalaran yang mirip dengan kemampuan penalaran manusia. Hal ini disebabkan karena sistem *fuzzy* mempunyai kemampuan untuk memberikan respon berdasarkan informasi yang bersifat kualitatif, tidak akurat, dan ambigu.

Fuzzy system (sistem kabur) didasari atas konsep himpunan kabur yang memetakan domain input ke dalam domain output. Perbedaan mendasar himpunan tegas dengan himpunan kabur adalah nilai keluarannya. Himpunan tegas hanya memiliki dua nilai output yaitu nol atau satu, sedangkan himpunan kabur memiliki banyak nilai keluaran yang dikenal dengan nilai derajat keanggotaannya. Logika *fuzzy* adalah peningkatan dari logika Boolean yang berhadapan dengan konsep kebenaran sebagian. Dimana logika

klasik (*crisp*) menyatakan bahwa segala hal dapat diekspresikan dalam istilah *binary* (nol atau satu, hitam atau putih, ya atau tidak). Logika *fuzzy* menggantikan kebenaran boolean dengan derajat kebenaran. Logika *fuzzy* memungkinkan nilai keanggotaan antara 0 dan 1, tingkat keabuan dan juga hitam dan putih, dan dalam bentuk linguistic, konsep tidak pasti seperti “sedikit”, “lumayan”, dan “sangat”. Pendekatan *fuzzy* memiliki kelebihan pada hasil yang terkait dengan sifat kognitif manusia, khususnya pada situasi yang melibatkan pembentukan konsep, pengenalan pola, dan pengambilan keputusan dalam lingkungan yang tidak pasti atau tidak jelas.

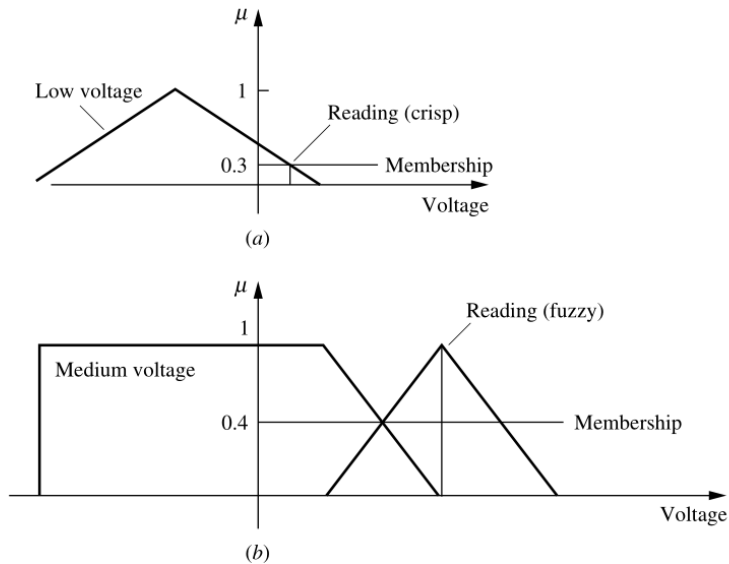
Kontrol logika *fuzzy* merupakan salah satu metode kendali yang dapat diaplikasikan dalam berbagai sistem kendali karena memberikan metode yang lebih sederhana untuk mengendalikan sebuah sistem menggunakan informasi dan data heuristik. Dalam perancangan kontrol logika *fuzzy*, diperlukan informasi mengenai metode pengendalian terlebih dahulu, informasi tersebut dijadikan dasar dalam melakukan pengendalian, gambar 2.6 menunjukkan alur kerja kontrol logika *fuzzy*



Gambar 2.7 Struktur Dasar Logika *Fuzzy*

Struktur KLF terdiri dari empat blok utama:

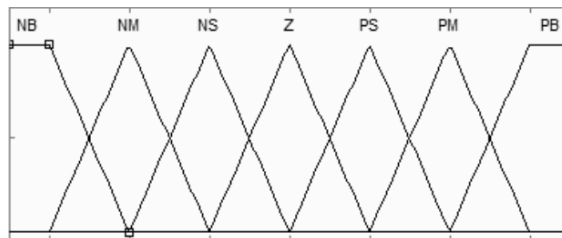
- a. Fuzzifikasi berfungsi untuk mengubah masukan-masukan yang nilai kebenarannya bersifat pasti (input *crisp*) ke dalam bentuk *fuzzy*. Dengan proses fuzzifikasi maka sebuah nilai diasosiasikan ke dalam fungsi keanggotaan himpunan dengan nilai keanggotaan tertentu.



Gambar 2.8 Perbandingan antara himpunan *fuzzy* dengan pembacaan *crisp* (a) dan himpunan *fuzzy* dengan pembacaan *fuzzy* (b)
Sumber: Ross, 2004

Pada gambar 2.8 digambarkan bahwa setiap nilai tegangan merupakan anggota dari himpunan *fuzzy* tertentu dan setiap anggota tersebut memiliki nilai keanggotaan terhadap suatu himpunan antara 0 sampai 1, sebuah nilai dapat menjadi anggota dari dua himpunan dengan nilai keanggotaan tertentu pada masing-masing himpunan. Gambar 2.8 (a) menunjukkan sebuah himpunan *fuzzy* yaitu himpunan *low voltage* yang meliputi rentang nilai dengan derajat keanggotaan tertentu, bacaan 0.3 adalah nilai keanggotaan yang bersifat *crisp*. Gambar 2.8 (b) menunjukkan pembacaan secara *fuzzy*.

Proses fuzzifikasi untuk sistem kendali gerak kapal selam dilakukan dengan pembagian berdasarkan nilai error *yaw* dan *yaw rate* untuk sistem kendali *heading*, sementara pada sistem kendali kedalaman, fuzzifikasi dilakukan berdasarkan nilai kedalaman dan *heave rate*. Nilai masukan (*input*) yang diterima oleh kontroler *fuzzy* dibagi menjadi beberapa himpunan yaitu NB (*Negative Big*), NM (*Negative Medium*), NS (*Negative Small*), Z (*Zero*), PS (*Positive Small*), PM (*Positive Medium*), dan PB (*Positive Big*). Contoh pembagian himpunan *fuzzy* untuk sistem kendali ditunjukkan gambar 2.9



Gambar 2.9 Pembagian Himpunan *Fuzzy*

- b. Basis pengetahuan (*rule base*) adalah aturan dasar yang menjelaskan metode kontrol dan hubungan antara masukan dan keluaran kontrol logika *fuzzy*. Cara yang umum dipakai untuk merepresentasikan pengetahuan manusia adalah ekspresi linguistik dengan bentuk:

IF *premise (antecedent)*, THEN *conclusion (consequent)*

Bentuk tersebut sering disebut dengan bentuk *rule-based* IF-THEN, bentuk ini disebut merupakan bentuk deduktif. Bentuk IF-THEN mengekspresikan sebuah inferensi dimana, apabila diketahui sebuah fakta (premis atau hipotesis), maka dapat dibuat sebuah kesimpulan atau konsekuensi. Bentuk representasi pengetahuan ini mempunyai karakteristik *shallow knowledge*, yang sesuai dalam konteks linguistik karena dapat mengekspresikan pengetahuan manusia secara empiris dan heuristik dalam bahasa komunikasi manusia. Bagaimanapun, sistem ini tidak meliputi bentuk pengetahuan yang lebih dalam yang meliputi intuisi, struktur, fungsi dan perilaku objek yang ada di sekitar kita karena bentuk-bentuk pengetahuan tersebut tidak dapat secara langsung direduksi menjadi frasa atau representasi linguistik.

Sistem *rule-based fuzzy* sangat berguna dalam memodelkan sistem kompleks yang dapat diobservasi oleh manusia karena dapat memanfaatkan variabel linguistik sebagai *antecedent* dan *consequent*, variabel linguistik dapat secara alami direpresentasikan sebagai himpunan *fuzzy* dan hubungan logis dari himpunan-himpunan tersebut.

- c. Sistem inferensi *fuzzy* berfungsi untuk melakukan penalaran dan pengambilan keputusan berdasarkan masukan *fuzzy* dan *rule base* yang telah ditentukan, sehingga menghasilkan keluaran *fuzzy*. Metode inferensi logika *fuzzy* dibedakan menjadi 3 tipe berdasarkan jenis masukan dan keluaran yaitu logika *fuzzy* murni, logika *fuzzy* Mamdani, dan logika *fuzzy* Takagi-Sugeno.
- i. Logika *fuzzy* murni adalah metode logika *fuzzy* dimana masukan dan keluarannya berupa linguistik. Kaidah *fuzzy* pada logika *fuzzy* murni adalah

JIKA masukan x_1 adalah F_1 DAN masukan x_2 adalah F_2 , MAKA keluaran y adalah G .

Dimana F_1 dan F_2 adalah himpunan *fuzzy* untuk masukan dan G adalah himpunan *fuzzy* untuk keluaran.

- ii. Logika *fuzzy* Mamdani adalah metode logika *fuzzy* dimana masukan dan keluarannya berupa nilai numerik. Kaidah *fuzzy* dari metode Mamdani adalah:

JIKA x_1 adalah A_1^k dan x_2 adalah A_2^k , MAKA y^k adalah B^k untuk $k = 1, 2, \dots, r$

Dimana A_1^k dan A_2^k adalah himpunan *fuzzy* yang merepresentasikan pasangan *antecedent* k , dan B^k adalah himpunan *fuzzy* yang merepresentasikan *consequent* k .

- iii. Logika *fuzzy* Takagi-Sugeno adalah metode logika *fuzzy* dimana keluaran berupa konstanta atau persamaan linier. Kaidah *fuzzy* dari metode logika *fuzzy* Takagi-Sugeno dinyatakan dalam bentuk:

$$L^{(l)}: \text{JIKA } x_1 \text{ adalah } F_1^l \text{ dan } \dots \text{ dan } x_n \text{ adalah } F_n^l, \text{ MAKA } Y^l = c_0^l + c_1^l x_1 + \dots + c_n^l x_n$$

Dimana F_1^l adalah himpunan *fuzzy*, c_1 adalah parameter berharga riil, y^l keluaran sistem oleh kaidah $L^{(l)}$ dimana $l = 1, 2, \dots, n$.

- d. Defuzzifikasi merupakan tahap mengubah keluaran *fuzzy* menjadi crisp value berdasarkan fungsi keanggotaan yang telah ditentukan menggunakan operator defuzzifikasi.

2.6 Kendali PID (*Proportional, Integral, Derivative*)

Kendali PID adalah kendali yang umum dipakai dalam aplikasi industri. Teknik kendali PID adalah pengendali yang merupakan kombinasi antara aksi kendali proporsional ditambah aksi kendali integral ditambah aksi kendali derivatif/turunan (Ogata, 1996). Kombinasi ketiga jenis aksi kendali ini bertujuan untuk saling melengkapi kekurangan-kekurangan dari masing-masing aksi kendali. Persamaan aksi kendali pada kendali PID dinyatakan pada persamaan 2.40.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.52)$$

Atau dalam bentuk fungsi transfer pada persamaan 2.41

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{K_p}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.53)$$

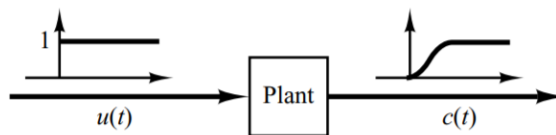
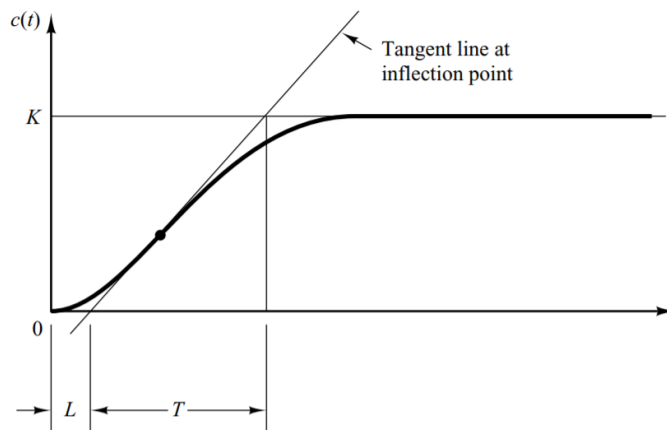
Dimana K_p adalah *gain* proporsional, T_i adalah waktu integral, dan T_d adalah waktu derivatif. Nilai K_p , T_i dan T_d disesuaikan dengan dinamika sistem yang dikendalikan sehingga mencapai performa respon yang optimal, proses penentuan nilai K_p , T_i dan T_d disebut dengan proses *tuning*.

2.7 Metode Ziegler-Nichols

Metode Ziegler-Nichols adalah salah satu metode yang digunakan dalam melakukan *tuning* kendali PID dengan pendekatan eksperimental. Pada metode Ziegler-Nichols, dilakukan eksperimen untuk memperoleh respon dari *plant* terhadap input *unit-step* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.8. Dengan memberikan input *step* maka akan diperoleh kurva-S respon seperti pada gambar 2.9. Kurva-S memiliki karakteristik yang dinyatakan oleh dua konstanta, yaitu *delay time* L dan *time constant* T . *Delay time* dan *time constant* ditentukan dengan menarik garis tangen pada titik infleksi dari kurva-S dan menentukan perpotongan dari garis tangen dengan sumbu waktu dan garis $c(t) = K$, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.9. Aturan penentuan nilai K_p , T_i dan T_d dengan metode Ziegler-Nichols I dijabarkan pada tabel 2.3

Tabel 2.3 Aturan Tuning Ziegler-Nichols Berdasarkan Respon Unit-Step Dari Plant

Tippe Kontroler	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

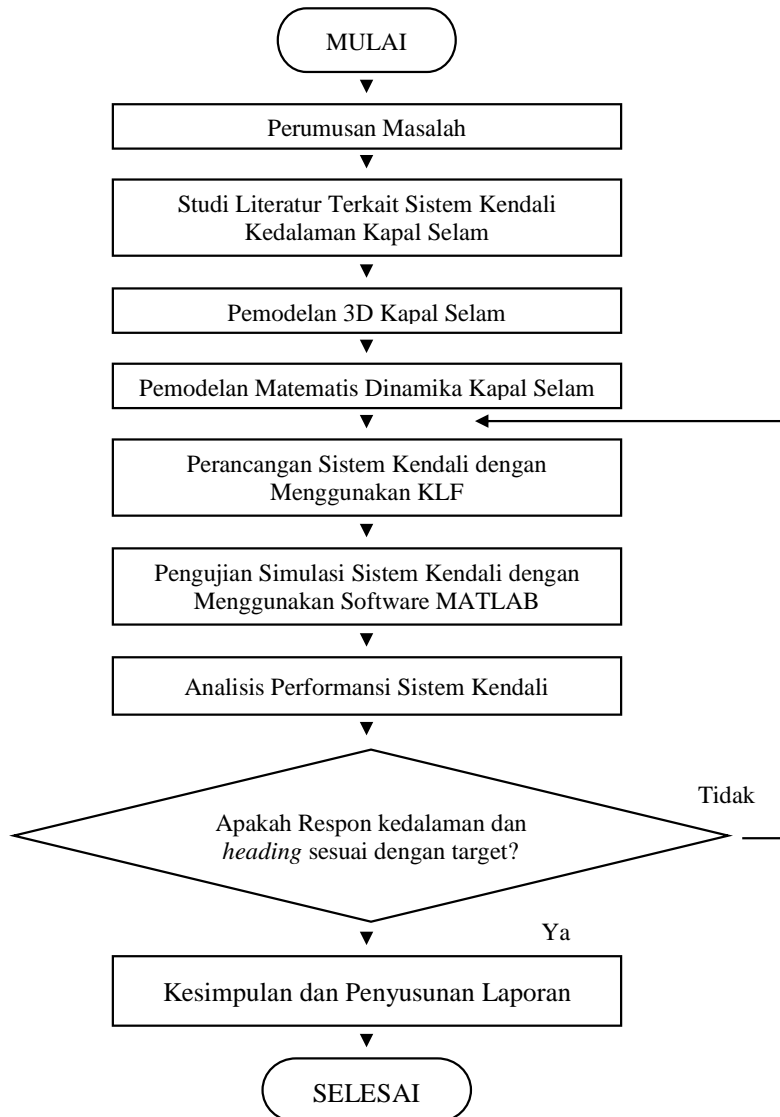
**Gambar 2.10** Respon Plant Terhadap Unit-Step
Sumber: Ogata, 2010**Gambar 2.11** Kurva-S Respon
Sumber: Ogata, 2010

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian

Agar penelitian berjalan dengan baik dan mencapai tujuan yang diharapkan, maka pada bab ini diuraikan mengenai tahapan-tahapan dalam pengerjaan Tugas Akhir. Gambar 3.1 adalah *flowchart* dari penelitian yang dilakukan.



Gambar 3.1 *Flowchart* Penelitian

3.1 Pemodelan Tiga Dimensi Kapal Selam

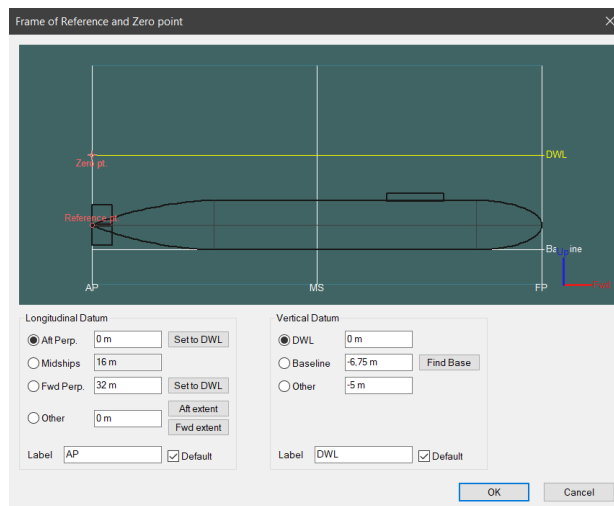
Tahap pertama dalam penelitian ini adalah melakukan pemodelan 3D kapal selam. Data yang digunakan pada tahap ini adalah data spesifikasi dari kapal selam mini yang sedang dikembangkan oleh BPPT (Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi). Tabel 3.1 merupakan data spesifikasi utama dari kapal selam.

Tabel 3.1 Spesifikasi Kapal Selam Mini

Spesifikasi	Nilai	Satuan
Panjang	32	m
Diameter	3,5	m
Tinggi	4	m
Kecepatan Maksimum	15	knot
<i>Silent Run</i>	4	knot
Kedalaman Maksimum	200	m
Kedalaman Snorkling	10	m

Pemodelan 3D kapal selam dilakukan dengan tujuan untuk memperoleh beberapa parameter yang dibutuhkan dalam melakukan pemodelan matematis pada tahap penelitian berikutnya. Parameter yang dapat diperoleh dengan melakukan pemodelan 3D tersebut adalah letak titik berat kapal selam sebagai titik *origin* dari sistem koordinat, *volume displacement* kapal selam, luas permukaan *rudder*, *stern plane*, dan *sail* dari kapal selam

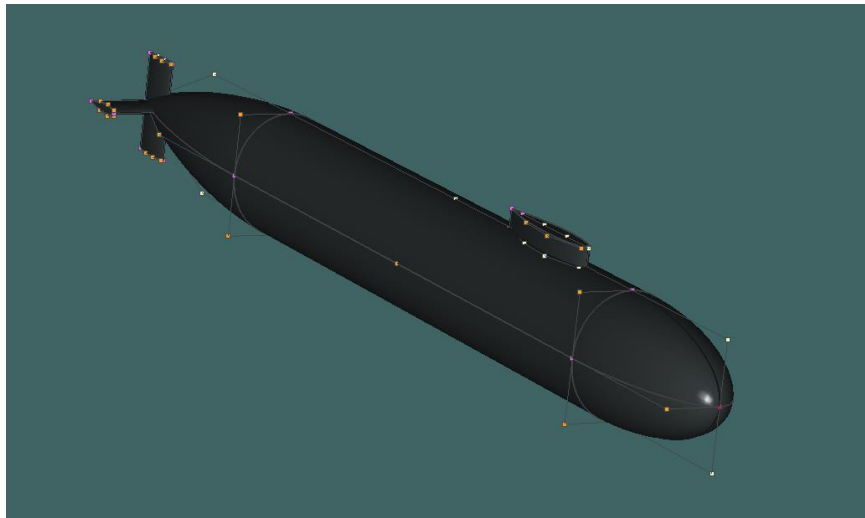
Pemodelan kapal selam dilakukan dengan menggunakan *software* Maxsurf Modeller. Pembuatan model tiga dimensi kapal selam dilakukan dengan menggunakan salah satu *sample design* kapal selam yang tersedia di dalam Maxsurf Modeller itu sendiri. Dari *sample design* tersebut kemudian dilakukan pengaturan-pengaturan pada menu bar Data agar model tiga dimensi kapal selam yang didapat sesuai dengan ukuran utama optimal.



Gambar 3.2 Menu *Frame of Reference and Zero Point*

Gambar 3.2 menunjukkan tampilan *software* Maxsurf Modeller yaitu menu pada Menu *Frame of reference and zero point*. Data dari spesifikasi kapal selam yang diberikan ke dalam *software* berupa panjang kapal selam.

Setelah melakukan pengaturan pada menu *frame of reference and zero point* maka dilakukan beberapa modifikasi dari bentuk *sample design* yang disediakan, khususnya pada bagian *sail*, *rudder* dan *stern plane*. Setelah melakukan modifikasi tersebut, hasil model 3D ditampilkan pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 Model 3D Kapal Selam

Software Maxsurf Modeller memiliki kemampuan untuk melakukan perhitungan hidrostatis, hal ini dibutuhkan untuk mengetahui karakteristik hidrostatis kapal selam yang diperlukan dalam perhitungan koefisien hidrodinamika kapal selam. Data yang diperoleh dari pemodelan 3D untuk pemodelan matematis kapal selam dijabarkan pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Parameter Perhitungan Hidrodinamika

Parameter	Nilai	Satuan
LCB	17,2	m
V_{disp}	229,7	m ³
Luas proyeksi <i>rudder</i>	4	m ²
Luas proyeksi <i>stern plane</i>	4	m ²
Luas proyeksi <i>sail</i>	15	m ²

3.2 Pemodelan Sistem Dinamik Kapal Selam

Pemodelan sistem dinamik dari kapal selam bertujuan untuk memodelkan sistem yang sesungguhnya ke dalam bentuk model matematis. Pemodelan matematis kapal selam menggunakan persamaan 2.2 untuk subsistem *heading* dan persamaan 2.8 untuk subsistem kedalaman (Fossen, 1994).

Dalam persamaan 2.2 dan persamaan 2.8 terdapat koefisien-koefisien hidrodinamika. Nilai dari koefisien hidrodinamika diperoleh dari persamaan 2.11 sampai dengan 2.49 pada bab II. Koefisien hidrodinamika memiliki bentuk dimensional seperti yang dibutuhkan untuk persamaan sistem dinamik kapal selam dan juga bentuk non-dimensional, normalisasi koefisien non-dimensional dilakukan dengan sistem *Prime I* (Fossen, 1994). Hasil pendekatan koefisien hidrodinamika dimensional kapal selam dijabarkan pada tabel 3.3 untuk subsistem *heading* dan tabel 3.4 untuk subsistem kedalaman.

Tabel 3.3 Koefisien Hidrodinamika Subsistem Heading

Koefisien	Nilai	Satuan
Y_v	-22641	N
Y_r	248840	N
N_v	-859985	Nm
N_r	-2435914	Nm
$Y_{\dot{v}}$	-29895	N
$Y_{\dot{r}}$	85	N
$N_{\dot{v}}$	2728	Nm
$N_{\dot{r}}$	-193698	Nm
Y_{δ}	2529	N
N_{δ}	-41220	Nm
I_{zz}	48868696	Kgm ²

Tabel 3.4 Koefisien Hidrodinamika Subsistem Kedalaman

Koefisien	Nilai	Satuan
Z_w	-22739	N
Z_q	138185	N
M_w	632551	Nm
M_q	-2252411	Nm
$Z_{\dot{w}}$	-29788	N
$Z_{\dot{q}}$	106	N
$M_{\dot{w}}$	-3383	Nm
$M_{\dot{q}}$	-193573	Nm
Z_{δ}	-2529	N
M_{δ}	-41220	Nm
I_{yy}	48868696	Kgm ²

Nilai koefisien hidrodinamika untuk subsistem *heading* yang telah dijabarkan pada tabel 3.3 kemudian disubstitusikan ke dalam persamaan 2.2, sehingga model matematis subsistem *heading* menjadi persamaan 3.1

$$\begin{bmatrix} 265359 & -85 & 0 \\ -2728 & 49062394 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + 10^6 \begin{bmatrix} 0.1560 & 0.2456 & 0 \\ 0.8600 & 2.4359 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2529 \\ -41220 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_R \quad (3.1)$$

Setelah mendapatkan persamaan 3.1, maka dilakukan operasi matriks untuk mendapatkan bentuk *state-space*. Bentuk state-space yang diperoleh untuk subsistem *heading* dinyatakan dalam persamaan 3.2.

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1042 & -1.8226 & 0 \\ -0.0018 & -0.0051 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0095 \\ -0.0008 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_R$$

$$\psi = [0 \quad 0 \quad 1] \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Koefisien hidrodinamik untuk subsistem kedalaman yang dijabarkan pada tabel 3.4 disubstitusikan ke dalam persamaan 2.8, sehingga model matematis subsistem kedalaman menjadi persamaan 3.3.

$$\begin{bmatrix} 265252 & -106 & 0 & 0 \\ 3383 & 49062269 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} + 10^6 \begin{bmatrix} 0.1511 & 0.3563 & 0 & 0 \\ -0.6326 & 2.2524 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 2.1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2529 \\ -41220 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_S \quad (3.3)$$

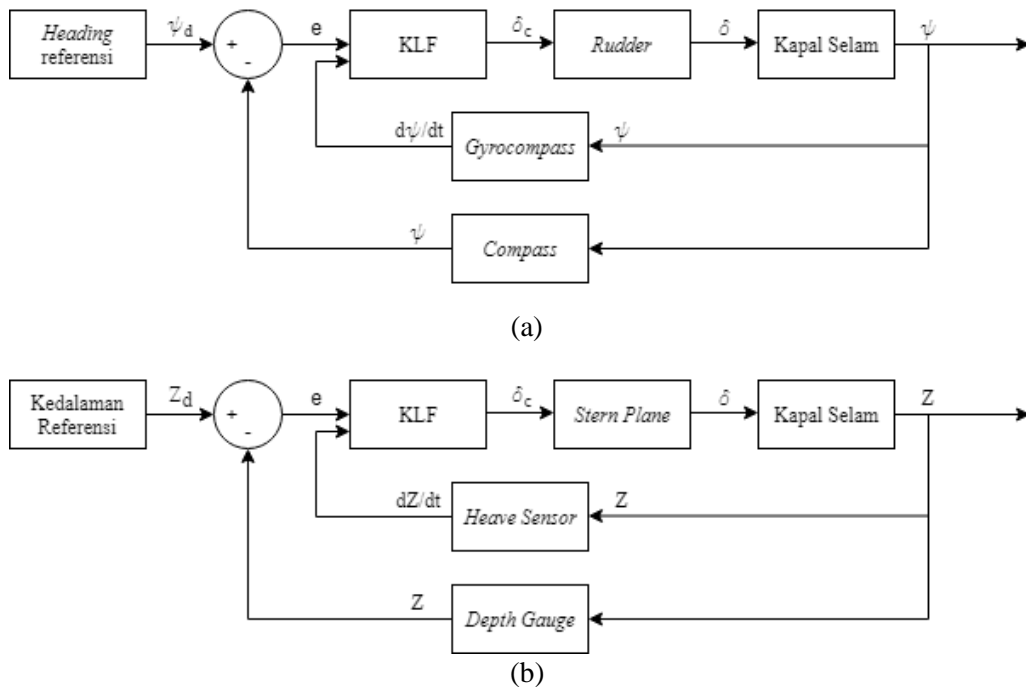
Setelah mendapatkan persamaan 3.3, maka dilakukan operasi matriks untuk mendapatkan bentuk *state-space*. Bentuk state-space yang diperoleh untuk subsistem kedalaman dinyatakan dalam persamaan 3.4.

$$\begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0857 & -1.8121 & 0 & 0 \\ 0.0143 & -0.0045 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -2.1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.0095 \\ -0.0008 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_S$$

$$z = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1] \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

3.3 Perancangan Sistem Kendali

Perancangan sistem kendali pada kapal selam menggunakan kendali logika *fuzzy*, diagram blok pengendalian ditunjukkan pada gambar 3.4.

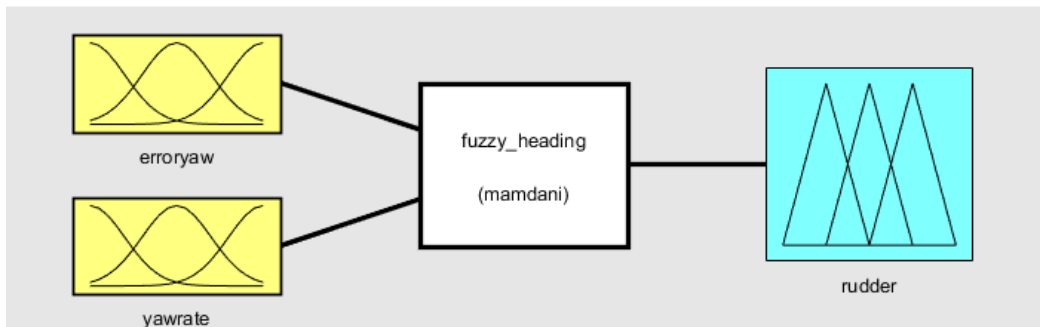


Gambar 3.4 Diagram Blok Kendali Heading (a) dan Kedalaman (b) Kapal Selam

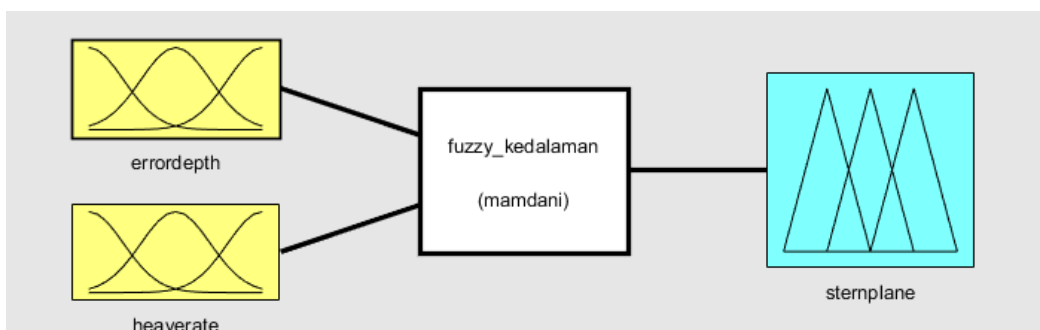
Gambar 3.4 menunjukkan bahwa *setpoint* dari sistem pengendalian adalah nilai *heading* dan kedalaman yang ingin dicapai. Pada sistem kendali *heading*, nilai *heading* referensi diteruskan menuju *summing point* sehingga menghasilkan output error yaw, nilai error tersebut diteruskan menuju kontroler logika *fuzzy* yang juga menerima input ke dua berupa *yaw rate*. Kontroler logika *fuzzy* melakukan inferensi berdasarkan kedua input untuk menentukan sudut *rudder* (δ_c) berdasarkan *ruler base* yang telah dirancang. Sudut *rudder* yang dikomandokan oleh kontroler logika *fuzzy* diteruskan menuju aktuatur, sehingga menjadi sudut actual (δ). Sistem kendali kedalaman memiliki diagram blok serupa, hanya saja input dari kontroler berupa nilai error kedalaman dan *heave rate* kapal selam dan aktuatur yang digunakan berupa *stern plane*.

3.3.1 Kendali Logika Fuzzy

Gambar 3.5 menunjukkan *input* dan *output* logika *fuzzy* pada sistem kendali *heading*, sementara gambar 3.6 menunjukkan *input* dan *output* pada sistem kendali kedalaman.



Gambar 3.5 Logika Fuzzy Sistem Kendali Heading Dengan Masukan Error Yaw dan Yaw Rate Serta Keluaran Sudut Rudder



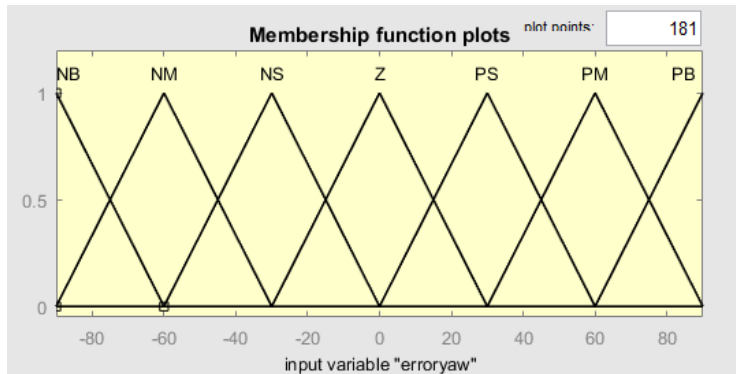
Gambar 3.6 Logika Fuzzy Sistem Kendali Kedalaman Dengan Masukan Error Kedalaman dan Heave Rate Serta Keluaran Sudut Stern Plane

Kendali logika fuzzy berfungsi untuk memberikan sinyal kepada *rudder* dan *stern plane* berupa besar sudut. Penjabaran mengenai sistem kendali logika fuzzy yang digunakan pada perancangan dijelaskan sebagai berikut.

a. Fuzzifikasi

Pada proses fuzzifikasi, sinyal masukan yang bersifat *crisp* (bukan *fuzzy*) dikelompokkan ke dalam himpunan-himpunan *fuzzy*. Pada kendali logika fuzzy subsistem *heading* masukan yang diterima kontroler berupa nilai *error yaw* dan *yaw rate*, sementara pada subsistem kedalaman masukan yang diterima kontroler berupa nilai *error kedalaman* dan *heave rate*.

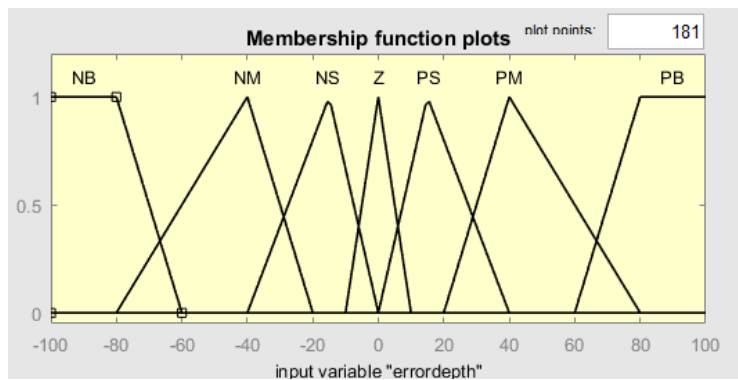
Masukan yang pertama yaitu *error yaw* untuk subsistem *heading* dan *error kedalaman* dikelompokkan ke dalam tujuh tingkatan himpunan *fuzzy* yaitu *Negative Big* (NB) *Negative Medium* (NM) *Negative Small* (NS) *Zero* (Z) *Positive Small* (PS) *Positive Medium* (PM) *Positive Big* (PB). Bentuk himpunan *fuzzy* yang digunakan adalah segitiga, diagram *fuzzy* yang menyatakan fungsi keanggotaan *input error yaw* untuk subsistem *heading* digambarkan pada gambar 3.7 dan fungsi keanggotaan *input error kedalaman* untuk subsistem kedalaman digambarkan pada gambar 3.8. Rentang masukan untuk *error yaw* bernilai antara -90° sampai 90° , sementara rentang masukan kedalaman adalah -100 m hingga 100 m.



Gambar 3.7 Fungsi Keanggotaan *Error Yaw*

Tabel 3.5 Rentang Fungsi Keanggotaan *Error Yaw*

No	Fungsi Keanggotaan	Rentang
1.	Negative Big (NB)	[-90; -60]
2.	Negative Medium (NM)	[-90; -60; -30]
3.	Negative Small (NS)	[-60; -30; 0]
4.	Zero (Z)	[-30; 0; 30]
5.	Positive Small (PS)	[0; 30; 60]
6.	Positive Medium (PM)	[30; 60; 90]
7.	Positive Big (PB)	[60; 90]

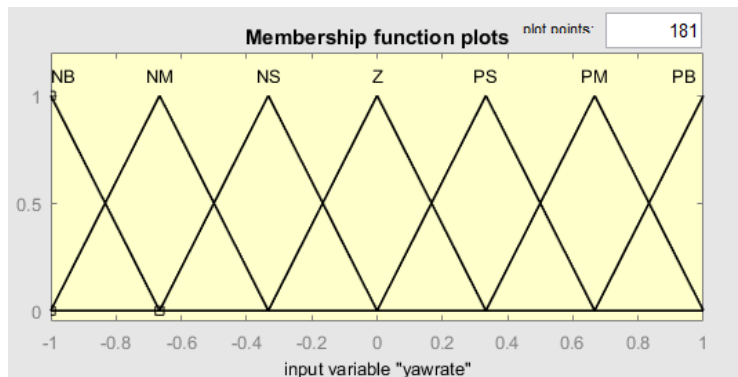


Gambar 3.8 Fungsi Keanggotaan *Error Kedalaman*

Tabel 3.6 Rentang Fungsi Keanggotaan *Error Kedalaman*

No	Fungsi Keanggotaan	Rentang
1.	Negative Big (NB)	[-100; -80; -60]
2.	Negative Medium (NM)	[-80; -40; -20]
3.	Negative Small (NS)	[-40; -15; 0]
4.	Zero (Z)	[-10; 0; 10]
5.	Positive Small (PS)	[0; 15; 40]
6.	Positive Medium (PM)	[20; 40; 80]
7.	Positive Big (PB)	[60; 80; 100]

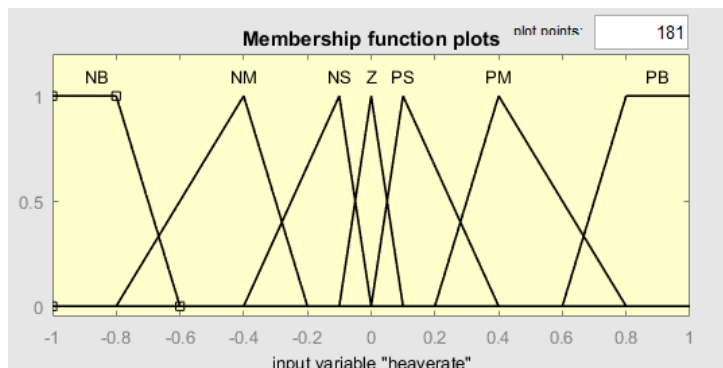
Masukan yang kedua yaitu *yaw rate* untuk subsistem *heading* dan *heave rate* untuk subsistem kedalaman, masukan kedua dikelompokkan ke dalam tujuh tingkatan himpunan *fuzzy* yaitu *Negative Big* (NB) *Negative Medium* (NM) *Negative Small* (NS) *Zero* (Z) *Positive Small* (PS) *Positive Medium* (PM) *Positive Big* (PB). Bentuk himpunan *fuzzy* yang digunakan adalah segitiga, diagram *fuzzy* yang menyatakan fungsi keanggotaan *input yaw rate* untuk subsistem *heading* digambarkan pada gambar 3.9 dan fungsi keanggotaan *heave rate* untuk subsistem kedalaman digambarkan pada gambar 3.10.



Gambar 3.9 Fungsi Keanggotaan *Yaw Rate*

Tabel 3.7 Rentang Fungsi Keanggotaan *Yaw Rate*

No	Fungsi Keanggotaan	Rentang
1.	Negative Big (NB)	$[-1; -0.6]$
2.	Negative Medium (NM)	$[-1; -0.6; -0.3]$
3.	Negative Small (NS)	$[-0.6; -0.3; 0]$
4.	Zero (Z)	$[-0.3; 0; 0.3]$
5.	Positive Small (PS)	$[0; 0.3; 0.6]$
6.	Positive Medium (PM)	$[0.3; 0.6; 1]$
7.	Positive Big (PB)	$[0.6; 1]$

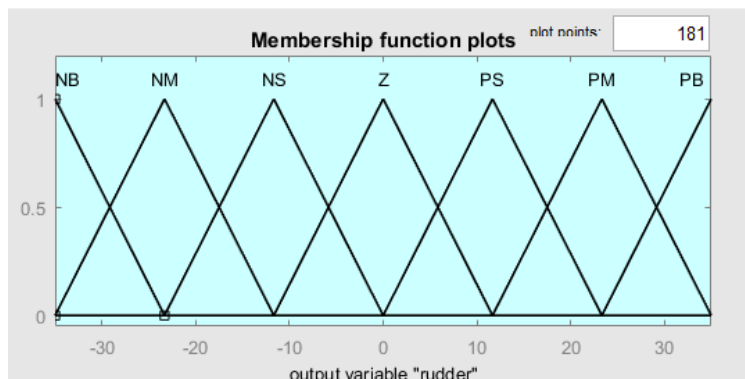


Gambar 3.10 Fungsi Keanggotaan *Heave Rate*

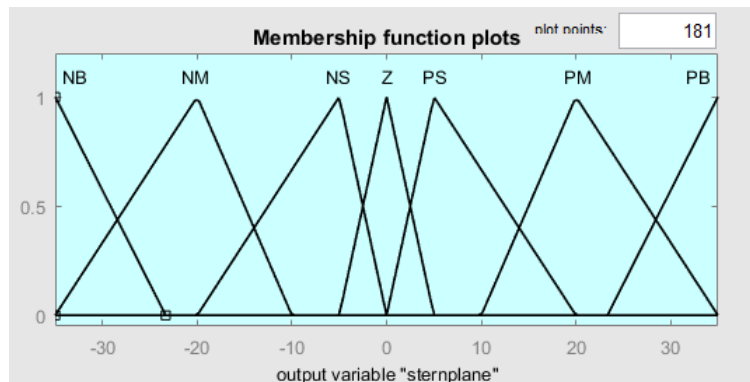
Tabel 3.8 Rentang Fungsi Keanggotaan *Heave Rate*

No	Fungsi Keanggotaan	Rentang
1.	Negative Big (NB)	[-1; -0.8; -0.6]
2.	Negative Medium (NM)	[-0.8; -0.4; -0.2]
3.	Negative Small (NS)	[-0.4; -0.1; 0]
4.	Zero (Z)	[-0.1; 0; 0.1]
5.	Positive Small (PS)	[0; 0.1; 0.4]
6.	Positive Medium (PM)	[0.2; 0.4; 0.8]
7.	Positive Big (PB)	[0.6; 0.8; 1]

Kedua masukan melalui proses inferensi logika *fuzzy* berdasarkan *rule base* yang telah ditetapkan, sistem inferensi *fuzzy* menghasilkan nilai keluaran berupa sudut komando untuk *rudder* dan *stern plane*. Sistem inferensi yang digunakan adalah sistem inferensi Mamdani. Nilai keluaran dikelompokkan ke dalam tujuh himpunan *fuzzy*, yaitu *Negative Big* (NB) *Negative Medium* (NM) *Negative Small* (NS) *Zero* (Z) *Positive Small* (PS) *Positive Medium* (PM) *Positive Big* (PB). Rentang keluaran kendali yaitu -35° sampai 35° .

**Gambar 3.11** Fungsi Keanggotaan *Rudder***Tabel 3.9** Rentang Fungsi Keanggotaan *Rudder*

No	Fungsi Keanggotaan	Rentang
1.	Negative Big (NB)	[-35; -23.33]
2.	Negative Medium (NM)	[-35; -23.33; -11.67]
3.	Negative Small (NS)	[-23.33; -11.67; 0]
4.	Zero (Z)	[-11.67; 0; 11.67]
5.	Positive Small (PS)	[0; 11.67; 23.33]
6.	Positive Medium (PM)	[11.67; 23.33; 35]
7.	Positive Big (PB)	[23.33; 35]



Gambar 3.12 Fungsi Keanggotaan *Stern Plane*

Tabel 3.10 Rentang Fungsi Keanggotaan *Stern Plane*

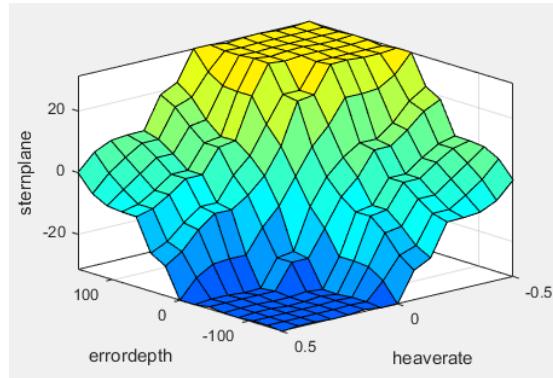
No	Fungsi Keanggotaan	Rentang
1.	Negative Big (NB)	[-35; -23.33]
2.	Negative Medium (NM)	[-35; -20; -10]
3.	Negative Small (NS)	[-20; -5; 0]
4.	Zero (Z)	[-5; 0; 5]
5.	Positive Small (PS)	[0; 5; 20]
6.	Positive Medium (PM)	[10; 20; 35]
7.	Positive Big (PB)	[23.33; 35]

b. *Rule Base*

Rule base pada kendali logika *fuzzy* merupakan aturan inferensi yang diturunkan secara linguistic sesuai dengan pemahaman dasar mengenai dinamika kapal. *Rule base* pada sistem inferensi logika *fuzzy* untuk subsistem *heading* dijabarkan pada tabel 3.5, dan untuk subsistem kedalaman dijabarkan pada tabel 3.6. *Rule base* dapat disajikan dalam bentuk grafik *surface*, Gambar 3.13 menunjukkan *surface view* dari *rule base* subsistem *heading*, dan gambar 3.14 untuk subsistem kedalaman.

Tabel 3.11 *Rule Base* Pengendalian KLF pada *Rudder* (Subsistem *Heading*)

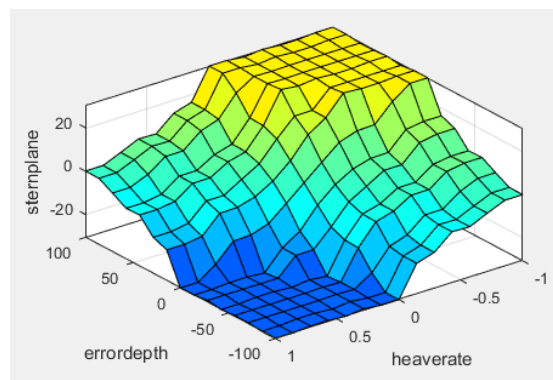
$\begin{matrix} e \\ r \end{matrix}$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	Z	NS	NM	NB	NB	NB	NB
NM	PS	Z	NS	NM	NB	NB	NB
NS	PM	PS	Z	NS	NM	NB	NB
Z	PB	PM	PS	Z	NS	NM	NB
PS	PB	PB	PM	PS	Z	NS	NM
PM	PB	PB	PB	PM	PS	Z	NS
PB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	Z



Gambar 3.13 Surface view rule base KLF subsistem heading

Tabel 3.12 Rule Base Pengendalian KLF pada Stern Plane (Subsistem Kedalaman)

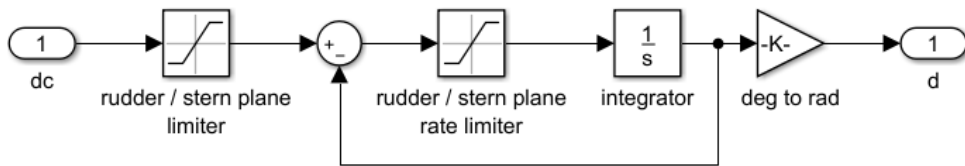
$\begin{smallmatrix} e \\ w \end{smallmatrix}$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	Z	PS	PM	PB	PB	PB	PB
NM	NS	Z	PS	PM	PB	PB	PB
NS	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PB
Z	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PS	NB	NB	NM	NS	Z	PS	PM
PM	NB	NB	NB	NM	NS	Z	PS
PB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	Z



Gambar 3.14 Surface view rule base KLF subsistem kedalaman

3.4 Pemodelan Aktuator

Aktuator yang digunakan dalam perancangan sistem kendali kapal selam berupa *rudder* dan *stern plane*. *Rudder* berfungsi untuk menentukan arah kapal pada bidang horizontal, sementara *stern plane* berfungsi untuk menentukan arah kapal pada bidang vertikal. Pada penelitian ini, model aktuator untuk subsistem *heading* dan *kedalaman* memiliki tipe yang sama. Model aktuator yang digunakan adalah tipe Van Amerongen dengan diagram blok yang ditunjukkan pada gambar 3.15.



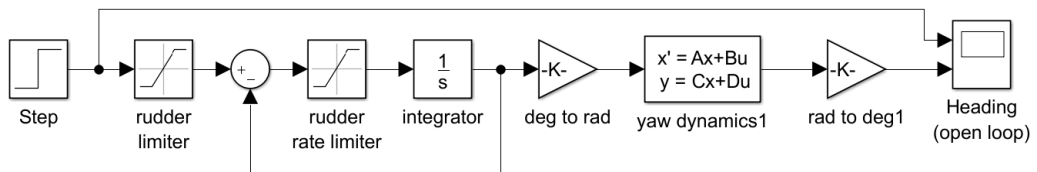
Gambar 3.15 Diagram Blok Aktuator (*Rudder dan Stern Plane*)

3.5 Pengujian Sistem Kendali Secara Simulasi

Untuk mengetahui apakah sistem kendali *heading* dan kedalaman yang dirancang telah sesuai dengan tujuan atau belum, perlu dilakukan pengujian dengan menggunakan *software* simulasi sistem kendali. Pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut

3.5.1 Pengujian *Open Loop*

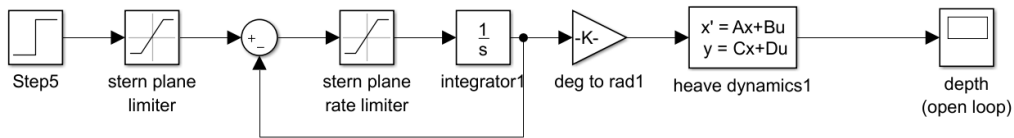
Pengujian *open loop* subsistem *heading* dilakukan untuk mengetahui respon sistem terhadap masukan berupa sudut *rudder*. Dengan melakukan pengujian ini dapat diketahui apakah arah gerak kapal selam (*yaw*) sudah sesuai dengan pemahaman dasar dinamika kapal. Blok diagram untuk pengujian *open loop* subsistem *heading* ditunjukkan pada gambar 3.16.



Gambar 3.16 Diagram Uji *Open Loop* Subsistem *Heading*

Masukan *step input* yang diberikan berupa sudut *rudder* positif yaitu 20° sehingga kapal berbelok ke arah kiri ($\psi < 0$) dan sudut *rudder* negative yaitu -20° sehingga kapal berbelok ke arah kanan ($\psi > 0$). Sinyal masukan diteruskan menuju rangkaian aktuator yang berfungsi untuk membatasi sudut *rudder* masukan dan kecepatan sudut *rudder*. Sinyal yang dihasilkan rangkaian aktuator berupa sudut aktual yang di umpan balikkan hingga sudut aktual sama dengan sudut masukan. Sinyal sudut aktual diteruskan menuju blok *state-space* dinamika kapal selam.

Pengujian *open loop* subsistem kedalaman dilakukan untuk mengetahui respon sistem terhadap masukan berupa sudut *stern plane*. Dengan melakukan pengujian ini dapat diketahui apakah arah gerak kapal selam (*heave*) sudah sesuai dengan pemahaman dasar dinamika kapal. Blok diagram untuk pengujian *open loop* subsistem kedalaman ditunjukkan pada gambar 3.17.

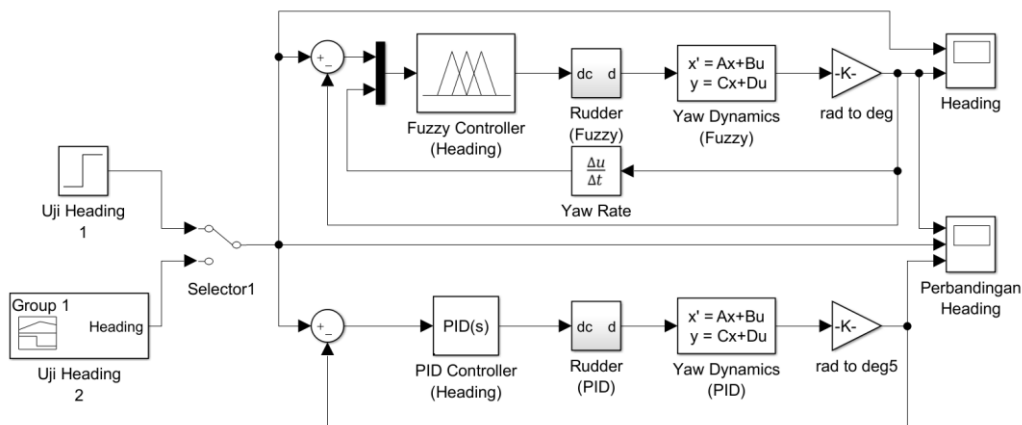


Gambar 3.17 Diagram Uji *Open Loop* Subsystem Kedalaman

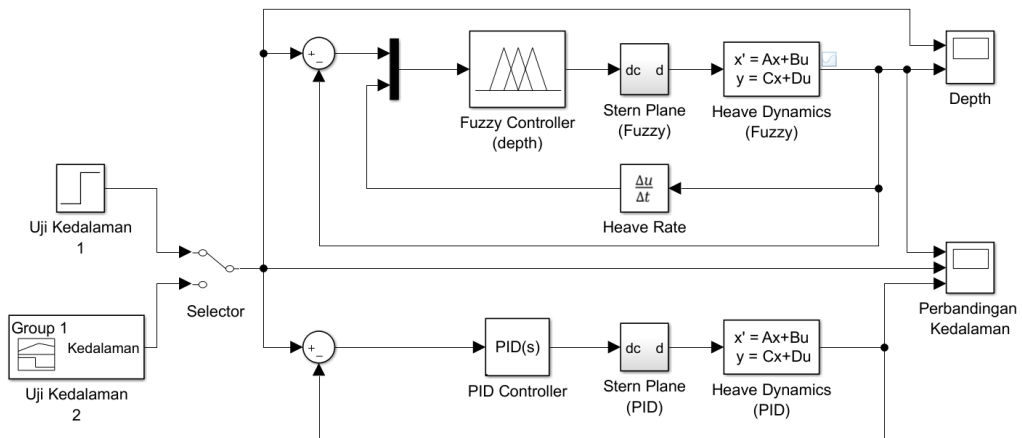
Masukan *step input* yang diberikan berupa sudut *stern plane* positif yaitu 20° sehingga kapal bergerak ke bawah ($z > 0$) dan *sudut stern plane* negative yaitu -20° sehingga kapal berbelok ke atas ($z < 0$). Rangkaian diagram blok pengujian *open loop* subsystem kedalaman hampir sama dengan subsystem *heading*.

3.5.3 Pengujian *Closed Loop*

Pengujian *closed loop* dilakukan dengan menganalisis respon sistem terhadap input *setpoint* yang diberikan. Validasi dari sistem pengendalian yang telah dirancang adalah dengan melakukan perbandingan performansi antara kendali logika *fuzzy* dan kendali PID. Karena perancangan kendali PID bukan merupakan fokus dari penelitian ini, maka kendali PID dirancang dengan menggunakan *tools* yang disediakan oleh *software* simulasi, sehingga *gain* dari kendali PID dapat diperoleh secara otomatis untuk mendapat respon yang optimal. Dalam melakukan *tuning* kendali PID, metode yang digunakan oleh *software* simulasi adalah metode Ziegler-Nichols yang telah dijelaskan pada bab tinjauan pustaka.



Gambar 3.18 Diagram Blok Uji *Closed Loop* Subsystem Heading



Gambar 3.19 Diagram Uji Blok *Closed Loop* Subsystem Kedalaman

Gambar 3.18 menunjukkan diagram blok simulasi sistem kendali *heading* yang terdiri dari sistem pengendalian dengan menggunakan kendali logika *fuzzy* dan kendali PID sebagai perbandingan. Pada uji kendali heading pertama, nilai *setpoint yaw* berupa input *step* sebesar 30° . Blok *scope* kemudian akan menampilkan data berupa grafik respon *yaw* terhadap waktu. Pada uji kendali heading kedua, nilai *setpoint* berupa input *step* sebesar 30° kemudian menjadi -30° pada detik ke 1500.

Gambar 3.19 menunjukkan diagram blok simulasi sistem kendali kedalaman. Uji sistem kendali kedalaman pertama dilakukan dengan nilai *setpoint* berupa input *step* kedalaman 50 m. Uji sistem kendali kedalaman yang kedua dilakukan dengan nilai *setpoint* berupa input *step* kedalaman 30 m kemudian menjadi -30 m pada detik ke 1600.

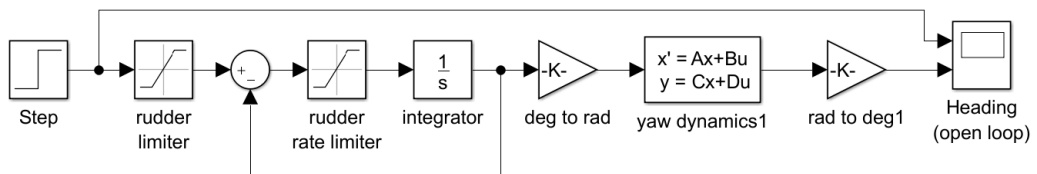
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Umum

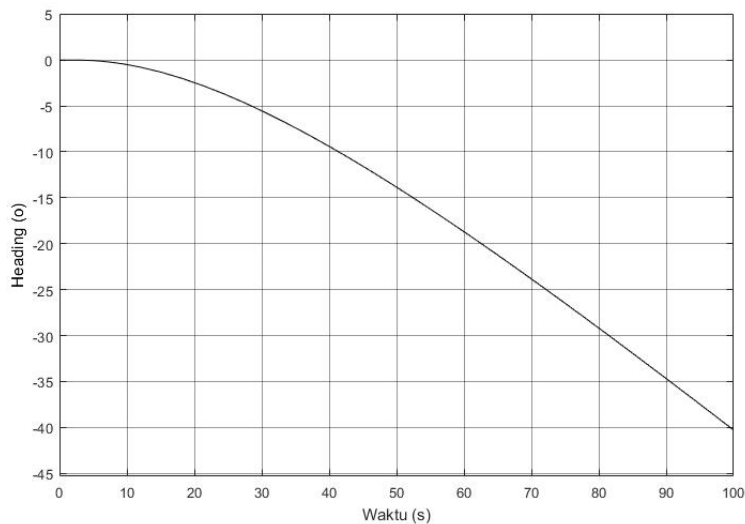
Pada bab ini dilakukan analisa dari hasil perancangan sistem kendali *heading* dan kedalaman kapal selam dengan menggunakan kontrol logika *fuzzy*. Pengujian simulasi sistem kendali *heading* dan kedalaman menggunakan *software* simulasi sistem kendali.

4.2 Analisis Simulasi *Open Loop* Sistem Kendali *Heading*

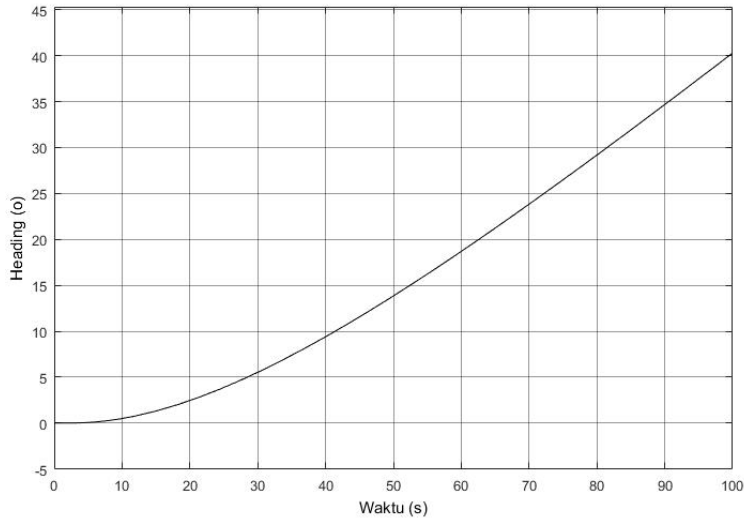


Gambar 4.1 Rangkaian Diagram Blok *Open Loop* Sistem Kendali *Heading*

Simulasi *open loop* untuk sistem kendali *heading* dilakukan sesuai dengan rangkaian yang ditunjukkan pada gambar 4.1. Tujuan dari simulasi *open loop* adalah untuk mengetahui respon yang dihasilkan oleh *plant* terhadap *input* (masukan) yang diberikan. Masukan untuk rangkaian *open loop* sistem kendali *heading* adalah sudut referensi (δ_c) untuk *rudder* kemudian diteruskan menuju aktuator yang menghasilkan sinyal keluaran berupa sudut aktual *rudder* (δ) menuju blok *state-space* sehingga nilai yang dihasilkan blok *state-space* berupa *heading* aktual kapal selam. Pada pengujian *open loop*, nilai *heading* aktual yang telah dicapai oleh kapal selam tidak diumpan-balikkan.



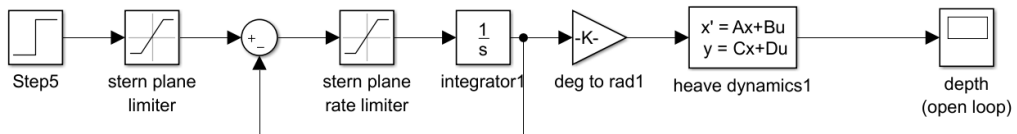
Gambar 4.2 Respon *Heading* pada Uji *Open Loop* dengan Masukan 20°



Gambar 4.3 Respon *Heading* pada Uji *Open Loop* dengan Masukan -20°

Gambar 4.2 dan gambar 4.3 adalah grafik respon dari kapal selam dengan masukan sinyal *step* sebesar 20° yang ditunjukkan pada gambar 4.2 dan -20° yang ditunjukkan pada gambar 4.3, sinyal *step* yang menjadi masukan merupakan besar sudut *rudder* yang dipertahankan selama rentang waktu 100 detik. Sudut *rudder* positif menyebabkan sudut kapal selam yang berkurang atau kapal bergerak ke arah kiri dan sudut negatif menyebabkan sudut kapal bertambah atau kapal bergerak ke arah kanan, hal ini sesuai dengan dinamika gerak kapal selam, sehingga dapat dikatakan bahwa model matematis subsistem *heading* sudah sesuai. Pada sistem kendali *heading open loop*, kapal selam tidak dapat mempertahankan sudut *heading* pada *setpoint* tertentu karena tidak ada *feedback* dari *plant* yang dikendalikan.

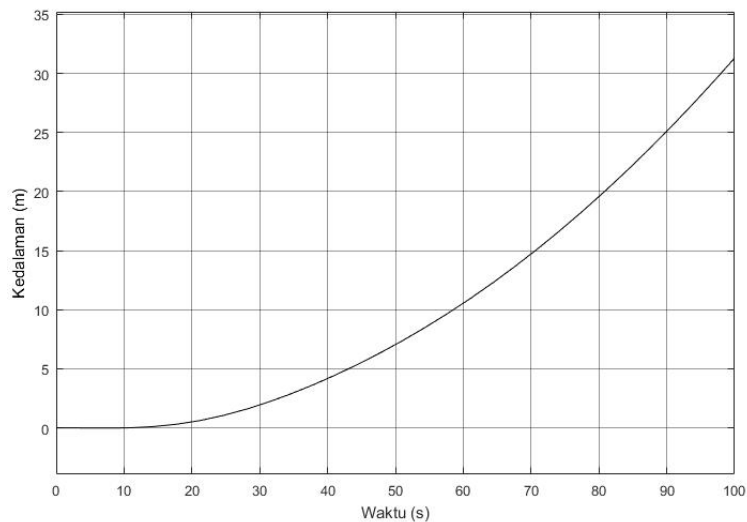
4.3 Analisis Simulasi *Open Loop* Sistem Kendali Kedalaman



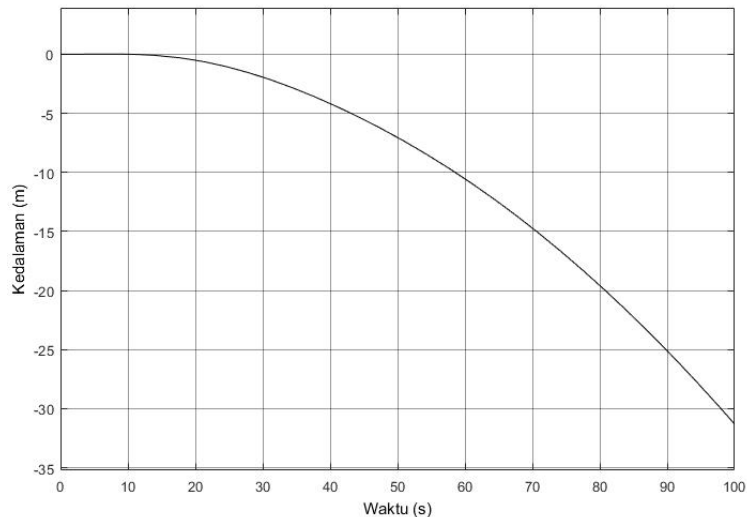
Gambar 4.4 Rangkaian Diagram Blok *Open Loop* Sistem Kendali Kedalaman

Simulasi *open loop* untuk sistem kendali kedalaman dilakukan sesuai dengan rangkaian yang ditunjukkan gambar 4.4. Masukan untuk rangkaian *open loop* sistem kendali kedalaman adalah sudut referensi untuk *stern plane* (δ_c) kemudian diteruskan menuju aktuator yang menghasilkan sinyal sudut *stern plane* aktual (δ). Berdasarkan sudut *stern plane* aktual, kapal selam bergerak pada bidang vertikal sesuai dengan persamaan *state-space*, sehingga blok *state-space* menghasilkan nilai kedalaman aktual. Pada uji *open*

loop sistem kendali kedalaman besar sudut *stern plane* yang diberikan adalah 20° dan -20° .



Gambar 4.5 Respon Kedalaman pada Uji *Open Loop* dengan Masukan 20°



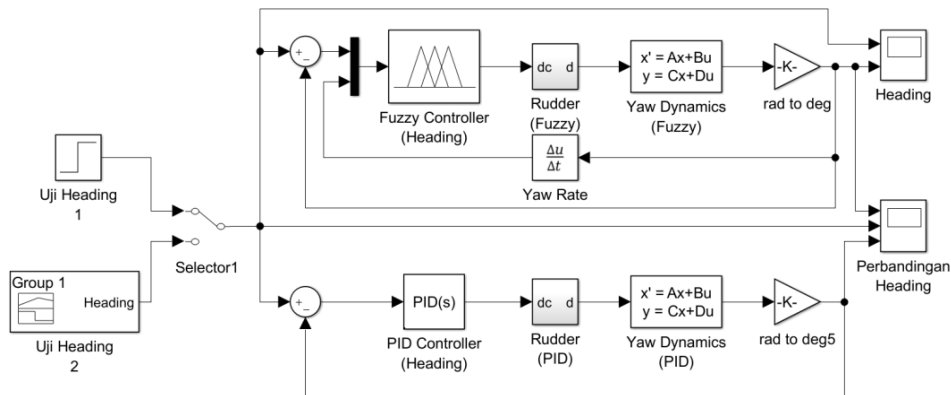
Gambar 4.6 Respon Kedalaman pada Uji *Open Loop* dengan Masukan -20°

Gambar 4.5 dan gambar 4.6 adalah grafik respon dari kapal selam dengan masukan sinyal step sebesar 20 yang ditunjukkan pada gambar 4.5 dan -20 yang ditunjukkan pada gambar 4.6, sinyal *step* yang menjadi masukan merupakan besar sudut *stern plane* yang dipertahankan selama rentang waktu 100 detik. Sudut *stern plane* positif (20°) menyebabkan kedalaman kapal selam yang terus bertambah dan sudut negatif (-20°) menyebabkan kedalaman kapal berkurang atau kapal bergerak ke atas, hal ini sesuai dengan dinamika gerak kapal selam, sehingga dapat dikatakan bahwa model matematis

subsistem *kedalaman* sudah sesuai. Pada sistem kendali kedalaman *open loop* kapal selam tidak dapat mempertahankan kedalaman pada *setpoint* tertentu karena tidak ada *feedback* dari *plant* yang dikendalikan.

4.4 Analisis Simulasi Sistem Kendali Heading

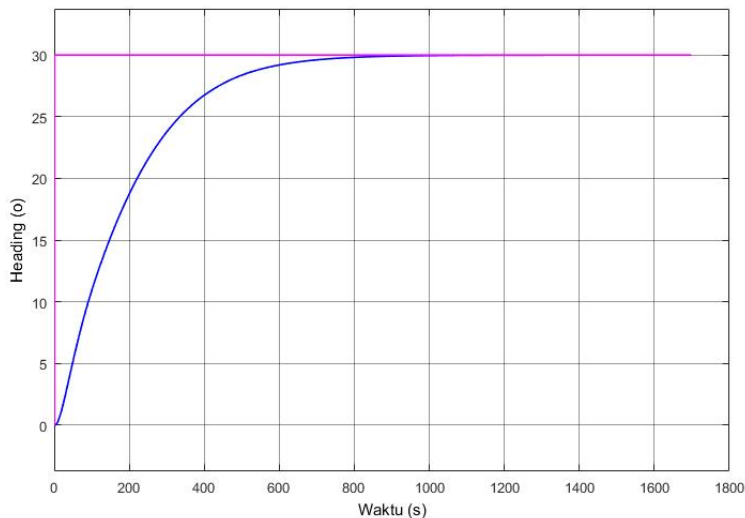
Simulasi *closed loop* untuk sistem kendali *heading* dilakukan sesuai dengan rangkaian pada gambar 4.7. Masukkan yang diberikan pada rangkaian diagram blok berupa sudut referensi atau sudut *setpoint* yang ingin dicapai kapal selam. Analisa dilakukan berdasarkan parameter performansi sistem pengendalian.



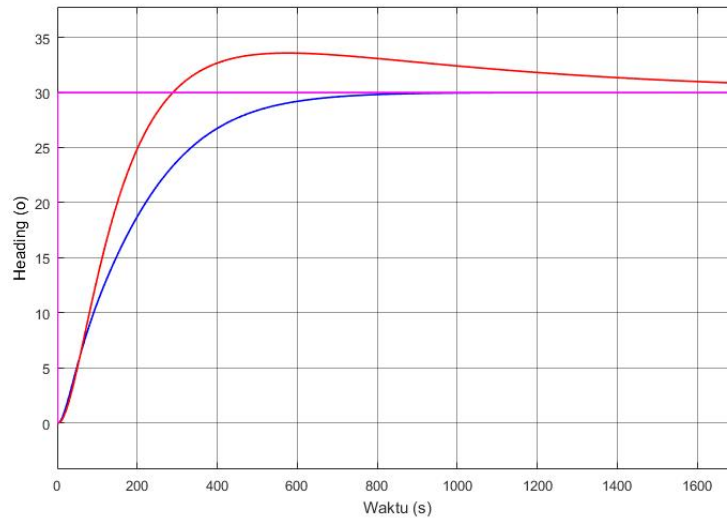
Gambar 4.7 Rangkaian Diagram Blok Uji *Closed Loop* Sistem Kendali Heading

4.4.1. Analisis Simulasi Sistem Kendali Heading dengan *Setpoint* Konstan

Pada simulasi sistem kendali *heading* yang pertama, nilai *setpoint* yang diberikan adalah sebesar 30° . Kendali yang digunakan dalam pengujian adalah kendali logika *fuzzy* dan kendali PID sebagai perbandingan.



Gambar 4.8 Respon Heading pada Uji *Closed Loop* Kendali Logika Fuzzy dengan *Setpoint* 30°



Gambar 4.9 Perbandingan Respon Heading pada Uji Closed Loop kendali *Fuzzy* (Biru) dan kendali PID (Merah) dengan setpoint 30°

Berdasarkan hasil simulasi sistem kendali *heading* dengan *setpoint* konstan, diperoleh nilai parameter performansi sistem kendali yang dijabarkan pada tabel 4.1.

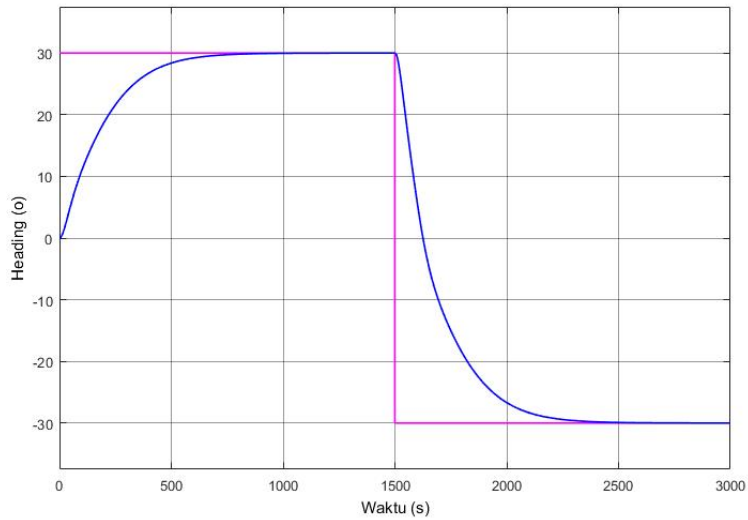
Tabel 4.1 Performansi Kendali *Fuzzy* dan Kendali PID dengan *Setpoint Heading* 30°

No	Parameter	Kendali <i>Fuzzy</i>	Kendali PID
1.	<i>Delay time</i> (s)	150.224	116.732
2.	<i>Rise time</i> (s)	650.191	296.449
3.	<i>Peak time</i> (s)	-	580.165
4.	<i>Maximum overshoot</i> ($^\circ$)	-	3.687
5.	<i>Settling time</i> (s)	650.191	1692.691
6.	<i>Steady-state error</i> ($^\circ$)	0	0.9

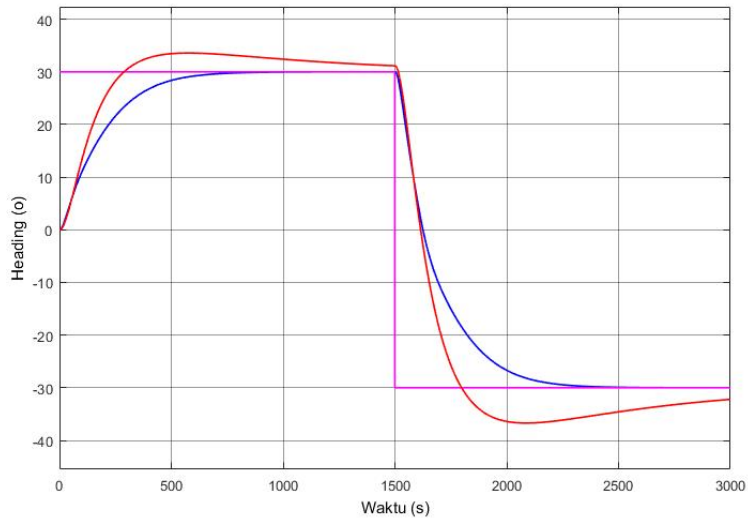
Gambar 4.8 menunjukkan respon kapal selam dengan kendali logika *fuzzy*. Dengan *heading setpoint* sebesar 30° , respon mencapai *set point* pada detik 650.191 s tanpa adanya *overshoot*. Sementara, gambar 4.9 menunjukkan perbandingan antara respon kendali PID dan kendali *fuzzy* dengan *set point* yang sama yaitu 30° . Kendali PID memiliki respon yang lebih cepat daripada kendali *fuzzy* karena telah mencapai *set point* pada detik 296.449, namun terjadi *overshoot* sebesar $3,68^\circ$ pada detik ke 580.165. *Settling time* pada sistem kendali dengan *fuzzy* bernilai 650.191 s sementara pada kendali PID bernilai 1692,288 s. Pada kendali *fuzzy* *steady-state error* bernilai 0° sementara pada detik ke 1800 respon PID memiliki *error* sebesar 0.9°

4.4.2 Analisis Simulasi Sistem Kendali *Heading* dengan *Setpoint* Berubah

Pada simulasi sistem kendali *heading* yang kedua, nilai *setpoint* pada detik pertama bernilai 30° kemudian pada detik ke 1500, *setpoint* berubah menjadi -30° . Kendali yang digunakan dalam pengujian adalah kendali logika *fuzzy* dan kendali PID sebagai perbandingan.



Gambar 4.10 Respon *Heading* Pada Uji *Closed Loop* Kendali *Fuzzy* dengan perubahan *setpoint*



Gambar 4.11 Perbandingan Respon *Heading* pada Uji *Closed Loop* kendali *Fuzzy* (Biru) dan kendali *PID* (Merah) dengan perubahan *setpoint*

Berdasarkan hasil simulasi sistem kendali *heading* dengan *setpoint* berubah, diperoleh nilai parameter performansi sistem kendali yang dijabarkan pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Performansi Kendali *Fuzzy* dan Kendali *PID* dengan Perubahan *Setpoint Heading*

No	Parameter	<i>Setpoint</i> (°)	Kendali <i>Fuzzy</i>	Kendali <i>PID</i>
1.	<i>Delay time</i> (s)	30°	150.224	112.897
		-30°	130.435	120.401
2.	<i>Rise time</i> (s)	30°	650.191	291.012
		-30°	995.798	311.037
3.	<i>Peak time</i> (s)	30°	-	591.848
		-30°	-	589.486

Tabel 4.2 Lanjutan

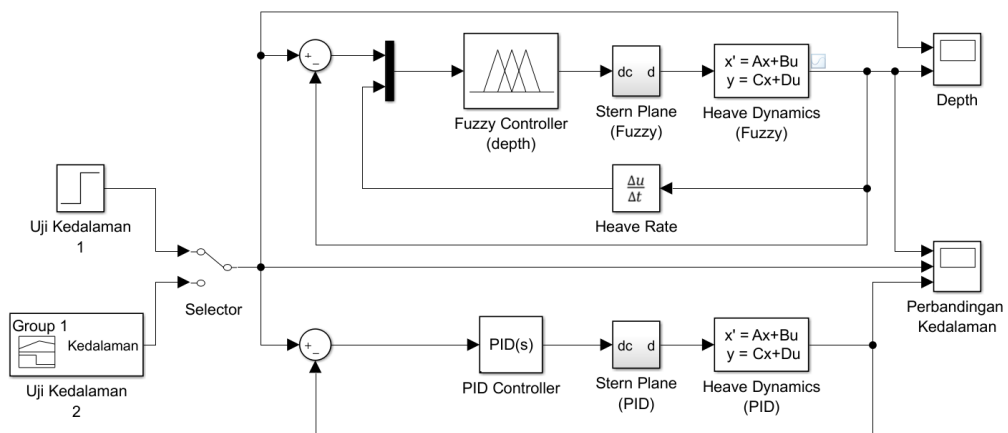
No	Parameter	Setpoint (°)	Kendali Fuzzy	Kendali PID
4.	Maximum overshoot (°)	30°	-	3.68
		-30°	-	6.89
5.	Settling time (s)	30°	650.191	1500
		-30°	995.798	3000
6.	Steady-state error (°)	30°	0	1.21
		-30°	0	2.31

Apabila dibandingkan dengan menggunakan kendali *fuzzy*, maka kendali PID memiliki respon yang awalnya lebih cepat atau lebih responsif, hal ini ditandai dengan *delay time* yang lebih cepat yaitu 112.897 s pada *setpoint* 30° dan 120.401 pada *setpoint* -30°, dibandingkan pada kendali *fuzzy* selama 150.224 s pada *setpoint* 30° dan 130.435 s pada *setpoint* -30°. Kendali *fuzzy* memiliki *rise time* lebih lama apabila dibandingkan dengan kendali PID, yaitu 650.191 s pada *setpoint* 30° dan 995.798 s pada *setpoint* -30°, sementara pada kendali PID memiliki *rise time* yang lebih cepat yaitu selama 291.012 s pada *setpoint* 30° dan 311.037 s pada *setpoint* -30°. Berdasarkan perbandingan *delay time* dan *rise time*, kendali *fuzzy* memiliki respon yang lebih lambat namun lebih stabil.

Jika dibandingkan dari segi *maximum overshoot* maka kendali *fuzzy* lebih unggul daripada kendali PID pada simulasi ini. Hal tersebut dikarenakan pada kendali *fuzzy* tidak terjadi *overshoot* sama sekali, baik pada *setpoint* 30° maupun pada *setpoint* 30°. Sementara, pada kendali PID *maximum overshoot* terjadi pada detik ke 591.848 sebesar 3.68° melewati *setpoint* 30° dan pada detik ke 589.486 setelah *setpoint* berubah menjadi -30° yaitu sebesar 6.89°.

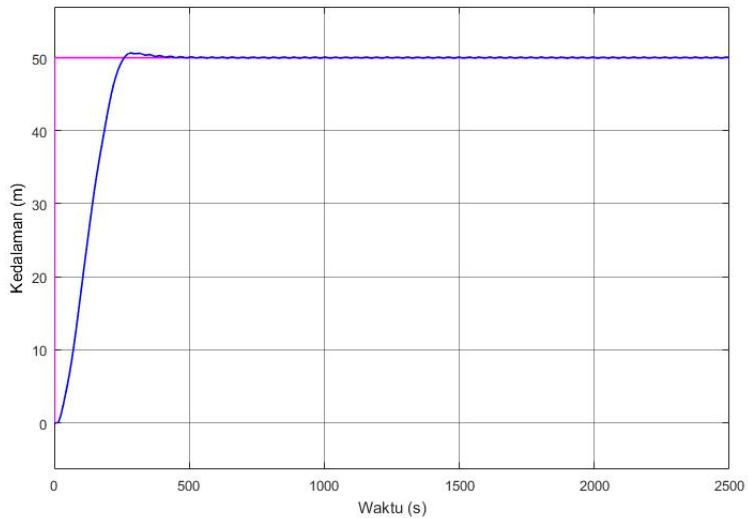
4.5 Analisis Simulasi Sistem Kendali Kedalaman

Pengujian *closed loop* untuk subsistem kedalaman dilakukan sesuai dengan rangkaian diagram blok pada gambar 4.12. Masukan yang diberikan pada rangkaian *closed loop* yaitu kedalaman yang ingin dicapai. Analisa dilakukan berdasarkan parameter performansi sistem pengendalian.

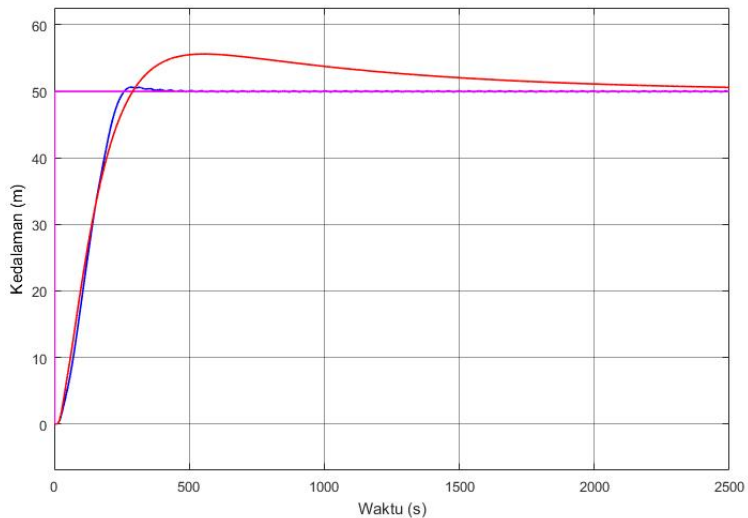
Gambar 4.12 Rangkaian Diagram Blok Uji *Closed Loop* Sistem Kendali Kedalaman

4.5.1 Analisis Simulasi Sistem Kendali Kedalaman dengan *Setpoint* Konstan

Pada simulasi sistem kendali kedalaman yang pertama, nilai *setpoint* kedalaman yang diberikan sebesar 50 m. Kendali yang digunakan dalam pengujian adalah kendali logika *fuzzy* dan kendali PID sebagai perbandingan.



Gambar 4.13 Respon Kendali *Fuzzy* pada Uji Kendali Kedalaman dengan *Setpoint* 50 m



Gambar 4.14 Perbandingan Respon Kendali *Fuzzy* (Biru) dan Kendali PID (Merah) pada Uji Kendali Kedalaman dengan *Setpoint* 50 m

Berdasarkan hasil simulasi sistem kendali kedalaman dengan *setpoint* konstan, diperoleh nilai parameter performansi sistem kendali yang dijabarkan pada tabel 4.3.

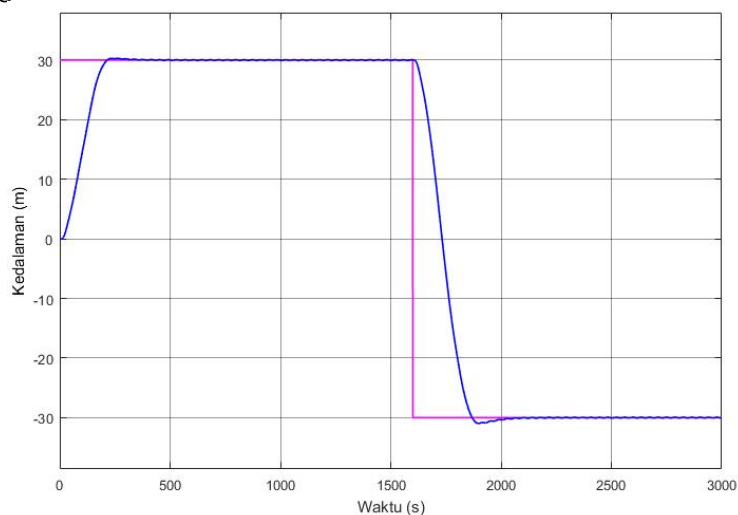
Tabel 4.3 Performansi Kendali *Fuzzy* dan Kendali PID dengan *Setpoint* Kedalaman 50 m

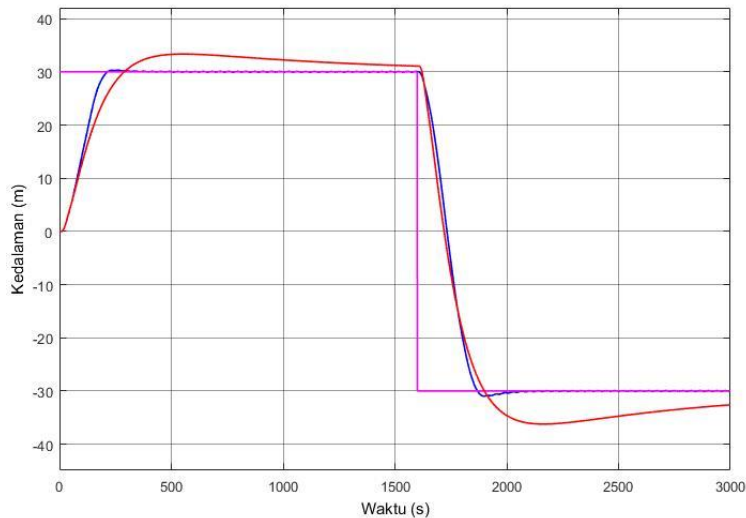
No	Parameter	Kendali <i>Fuzzy</i>	Kendali PID
1.	<i>Delay time</i> (s)	123.762	113.861
2.	<i>Rise time</i> (s)	264.831	287.169
3.	<i>Peak time</i> (s)	289.543	561.779
4.	<i>Maximum overshoot</i> (m)	0.61	5.61
5.	<i>Settling time</i> (s)	452.705	2087.177
6.	<i>Steady-state error</i> (m)	0.07	1

Berdasarkan data pada tabel 4.3, sistem kendali kedalaman dengan kendali *fuzzy* memiliki *delay time* yang lebih lama daripada sistem kendali kedalaman dengan kendali PID, yaitu 123.762 s pada kendali *fuzzy* dan 113.861 pada kendali PID. Walaupun demikian, respon kendali *fuzzy* lebih cepat mencapai *setpoint* daripada kendali PID, yang terlihat dari *rise time* kendali *fuzzy* yang lebih cepat daripada kendali PID yaitu 264.831 s dengan kendali *fuzzy* sementara pada kendali PID *setpoint* dicapai pada 287.169 s. Kendali *fuzzy* memiliki *overshoot* senilai 0.61 m, sehingga lebih rendah apabila dibandingkan dengan *overshoot* pada kendali PID sebesar 5.61 m. Pada gambar 4.14 dapat dilihat bahwa kendali *fuzzy* mencapai *steady-state* pada detik ke 452.705, sementara kendali PID mencapai toleransi 2% dari *setpoint* pada detik ke 2087.177 dengan *steady-state error* yang lebih besar dibandingkan dengan kendali *fuzzy*.

4.5.1 Analisis Simulasi Sistem Kendali Kedalaman dengan *Setpoint* Berubah

Pada pengujian *closed loop* sistem kendali kedalaman yang kedua, nilai *setpoint* pada detik pertama bernilai 30 m kemudian pada detik ke 1600, *setpoint* berubah menjadi -30 m. Kendali yang digunakan dalam pengujian adalah kendali logika *fuzzy* dan kendali PID sebagai perbandingan. Simulasi perubahan kedalaman dilakukan dengan membandingkan respon kendali *fuzzy* dengan kendali PID dengan nilai masukan yang sama, respon aktual kapal selam dengan kendali PID dapat dilihat pada gambar 4.16 ditandai dengan kurva berwarna merah.



Gambar 4.15 Respon Kendali *Fuzzy* pada Uji Kendali Kedalaman dengan *Setpoint* Berubah**Gambar 4.16** Perbandingan Respon Kendali *Fuzzy* (Biru) dan kendali PID (Merah) pada Uji Kendali Kedalaman dengan *Setpoint* Berubah

Berdasarkan simulasi sistem kendali kedalaman dengan *setpoint* berubah, diperoleh nilai parameter performansi sistem kendali yang dijabarkan pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Performansi Kendali *Fuzzy* dan Kendali PID dengan Perubahan *Setpoint*

No	Parameter	<i>Setpoint</i> (m)	Kendali <i>Fuzzy</i>	Kendali PID
1.	<i>Delay time</i> (s)	30	104.183	100.167
		-30	130.435	105.393
2.	<i>Rise time</i> (s)	30	216.264	250.417
		-30	268.598	273.642
3.	<i>Peak time</i> (s)	30	260.828	494.168
		-30	323.641	499.017
4.	<i>Maximum overshoot</i> (m)	30	0.31	2.81
		-30	0.97	5.29
5.	<i>Settling time</i> (s)	30	318.467	1500
		-30	511.622	3000
6.	<i>Steady-state error</i> (m)	30	0.06	0.91
		-30	0.05	2.1

Apabila dibandingkan dengan menggunakan kendali *fuzzy*, maka kendali PID memiliki respon yang awalnya lebih cepat atau lebih responsif, hal ini ditandai dengan *delay time* yang lebih cepat yaitu 100.167 s pada *setpoint* 30 m dan 105.393 s pada *setpoint* -30 m, dibandingkan pada kendali *fuzzy* selama 104.183 s pada *setpoint* 30 m dan 130.435 s pada *setpoint* -30 m. Namun, kendali *fuzzy* memiliki *rise time* lebih singkat apabila dibandingkan dengan kendali PID, yaitu 216.264 s pada *setpoint* 30 m dan 268.598 s pada *setpoint* -30 m, sementara pada kendali PID memiliki *rise time* selama 250.417 s pada *setpoint* 30 m dan 273.642 s pada *setpoint* -30 m.

Apabila dibandingkan dari segi *maximum overshoot* maka kendali *fuzzy* memiliki nilai *overshoot* yang sangat rendah apabila dibandingkan dengan kendali PID. Pada kendali *fuzzy overshoot* terjadi pada detik ke 260.828 sebesar 0.31 m sejak *setpoint* 30 m diberikan dan 323.641 s setelah *setpoint* -30 m diberikan sebesar 0.97 m, sementara pada kendali PID *overshoot* terjadi pada detik ke 494.168 sebesar 2.81 m sejak *setpoint* 30 m dan 499.017 s sebesar 5.29 m setelah *setpoint* -30 m diberikan. *Overshoot* yang relatif rendah dari kendali *fuzzy* menyatakan bahwa kendali *fuzzy* memiliki kestabilan yang lebih baik.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari perancangan sistem kendali *heading* dan kedalaman kapal selam dengan menggunakan kontrol logika *fuzzy* yang telah dibuat adalah sebagai berikut :

1. Sistem kendali *heading* menggunakan kendali logika *fuzzy* dirancang dengan menerima masukan berupa *error yaw* dan *yaw rate*, kemudian kedua nilai tersebut diinferensikan dengan metode Mamdani untuk menghasilkan keluaran berupa sudut *rudder*. Pada simulasi sistem kendali *heading* dengan *setpoint* konstan (30°) diperoleh performansi kendali *fuzzy* dengan *delay time* selama 150,224 s, *rise time* dan *settling time* selama 650,191 s, tanpa adanya *overshoot* dan *steady-state error*. Apabila dibandingkan dengan kendali PID, kendali *fuzzy* memiliki *delay time* dan *rise time* yang lebih lama, namun tidak terjadi *overshoot*. Karakteristik yang sama juga terlihat pada simulasi sistem kendali *heading* dengan *setpoint* berubah.
2. Sistem kendali kedalaman menggunakan kendali logika *fuzzy* dirancang dengan menerima masukan berupa *error* kedalaman dan *heave rate*, kemudian kedua nilai tersebut diinferensikan dengan metode Mamdani untuk menghasilkan keluaran berupa sudut *stern plane*. Pada simulasi sistem kendali kedalaman dengan *setpoint* konstan (50 m) diperoleh performansi kendali *fuzzy* dengan *delay time* selama 123,762 s, *rise time* selama 264,831, terjadi *overshoot* pada detik ke 289,543 sebesar 0,61 m, *settling time* selama 452,705 s dan *steady-state error* sebesar 0,07 m. Apabila dibandingkan dengan kendali PID, kendali *fuzzy* memiliki *delay time* yang lebih lambat namun *rise time* yang lebih cepat, *overshoot* yang terjadi dengan menggunakan kendali PID lebih besar dan *settling time* kendali PID lebih lama. Karakteristik yang sama juga terlihat pada simulasi sistem kendali kedalaman dengan *setpoint* berubah.
3. Sistem kendali *heading* dan kedalaman kapal selam dengan kontrol logika *fuzzy* yang dirancang mampu mencapai dan menjaga *heading* dan kedalaman pada *setpoint* yang ditargetkan. Berdasarkan simulasi perbandingan yang telah dilakukan, kendali logika *fuzzy* memiliki performansi yang lebih baik daripada kendali PID, sehingga dapat dijadikan alternatif pengganti kendali PID yang sudah umum dipakai pada kapal selam.

5.2 Saran

Untuk menyempurnakan penelitian ini maka terdapat beberapa saran yang dapat dilakukan pada penelitian selanjutnya, antara lain :

1. Melakukan eksperimen berbasis model skala atau simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamic*) untuk memperoleh nilai koefisien hidrodinamika yang lebih akurat.
2. Merancang sistem kendali dengan mengkombinasikan kendali logika *fuzzy* dengan metode kendali lainnya, misalnya kendali *neuro-fuzzy*, kendali *fuzzy-PID* dan sebagainya, khususnya untuk aplikasi kapal selam atau kendaraan bawah air lainnya.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Burcher, R. dan R. Louis. 1994. *Concepts in Submarine Design*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Feldman J. 1979. *DTNSRDC Revised Standard Submarine Equations of Motion*. Bethesda: David W. Taylor Naval Ship Research and Development Center.
- Fossen, T. I. 1994. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. Norway: John Wiley & Sons Ltd.
- Fossen, T. I. 2011. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. Chicester: John Wiley & Sons Ltd.
- Lind, E. dan Magnus M. 2014. *Simulation and Control of Submarines*. Lund: Lund University.
- MATLAB: Primer R2017b*. Natick: MathWorks, Inc.
- Mishra, S. dan Karanki D. *Heading Control of An Underwater Vehicle*. Rourkela: National Institute of Technology Rourkela.
- Nguyen H.T., et. al. 2003. *A First Course in Fuzzy and Neural Control*. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC
- Nise, N. S. 2011. *Control Systems Engineering*. John Wiley & Sons Ltd.
- Ogata, K. 2010. *Modern Control Engineering*. New Jersey: Pearson Education
- Omerdic, E. dan Zoran V. 2003. *A Fuzzy Track-Keeping Autopilot for Ship Steering*. Zagreb: University of Zagreb
- Passino, K.M., and Stephen Y. 1998. *Fuzzy Control*. Menlo Park: Addison-Wesley Longman, Inc.
- Renilson, M. 2015. *Submarine Hydrodynamics*. London: Springer.
- Ross, T. J. 2004. *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. Chichester : John Wiley & Sons Ltd.
- Sari, R. M. 2016. *Perancangan Sistem Guidance pada Kapal LNG Tanker untuk Memenuhi Trajectory Rute Surabaya-Banjarmasin Berbasis Logika Fuzzy*
- Singh, M. P., dan Bilas C. *Control of Autonomous Underwater Vehicles*. Rourkela: National Institute of Technology Rourkela

Surendra, K. dan B. Leela K. *Performance Comparison of PID and FLC Controller for Submarine Depth Control Using LabVIEW*

Thune, S. 2015. *Simulation of Submarine Manoeuvring*. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology.

LAMPIRAN

A. Spesifikasi Kapal Selam

Diameter	:	3.5 m
Tinggi total	:	4 m
Panjang	:	32 m
Kecepatan	:	4 knot
	:	2.1 m/s
Kedalaman snorkling	:	10 m
Kedalaman maksimum	:	200 m

B. Perhitungan Koefisien Hidrodinamika

x_g	=	17.22 m	(from AP)		
x_b	=	17.22 m			
u_0	=	2.1 m/s			
V_{disp}	=	230 m ³		Sistem Prime I	
ρ_{sw}	=	1025 kg/m ³		$(1/2)\rho L^3$	= 16793600
m	=	$\rho_{sw} \times V$		$(1/2)\rho U^2 L^2$	= 2218400.973
	=	235464 kg		$(1/2)\rho U^2 L^3$	= 70988831.13
m'	=	$\frac{m}{(1/2)\rho L^3}$		$(1/2)\rho L^5$	= 17196646400
	=	0.014			

Koefisien	Dimensional	Non-Dim
Zw	- 22,739	-0.010250
Zq	138,185	0.062290
Mw	632,551	0.008911
Mq	- 2,252,411	-0.031729
Zdw	- 29,788	-0.013428
Zdq	106	0.000048
Mdw	- 3,383	-0.000048
Mdq	- 193,573	-0.002727
Zdel	- 2,529	-0.001140
Mdel	- 41,220	-0.000581
ly	48,868,696	0.002842

Koefisien	Dimensional	Non-Dime
Yv	- 27,641	-0.012460
Yr	248,840	0.112171
Nv	- 859,985	-0.012114
Nr	- 2,435,914	-0.034314
Ydv	- 29,895	-0.013476
Ydr	85	0.000038
Ndv	2,728	0.000038
Ndr	- 193,698	-0.002729
Ydel	2,529	0.001140
Ndel	- 41,220	-0.000581
lz	48,868,696	0.002842

SUBSISTEM KEDALAMAN

$$Z_w = Z'_w \times (1/2)\rho U^2 L^2$$

$$(1/2)\rho U^2 L^2 = 2218401$$

Hull

$$Z'_w = \left[0.5 \left(\frac{L}{D} \right) - 11 \right] \times 10^{-3}$$

$$Z'_{wH} = -0.006$$

Appendage

$$Z_{wapp} = -\frac{1}{2} \rho V S_a (C_{L\alpha} + C_D)$$

$$C_{L\alpha} = 2.400$$

$$C_D = 0.010$$

$$S_a = 3.338$$

$$Z_{wapp} = -8477.590$$

$$Z'_{wapp} = -0.004$$

$$Z'_w = -0.010$$

$$Z_w = -22739$$

$$Z_q = Z'_q \times (1/2)\rho U^2 L^2$$

$$(1/2)\rho U^2 L^2 = 2218401$$

Hull

$$Y'_r = Z'_q = 0$$

$$Z'_{qH} = 0$$

Appendage

$$Z_{qapp} = l_{app} \times Z_{wapp}$$

$$l_{app} = -16.300$$

$$Z_{wapp} = -8477.590$$

$$Z_{qapp} = 138184.712$$

$$Z'_{qapp} = 0.062$$

$$Z'_q = 0.062$$

$$Z_q = 138185$$

$$Mw = M'w \times (1/2)\rho U^2 L^3$$

$$(1/2)\rho U^2 L^3 = 70988831.13$$

Hull

$$M'_w = \left[-\left(\frac{L}{D}\right) + 20 \right] \times 10^{-3}$$

$$M'w_H = 0.011$$

Appendage

$$M_{w_{app}} = -l_{app} \times Z_{w_{app}}$$

$$l_{app} = -16.300$$

$$Z_{w_{app}} = -8477.590$$

$$M_{w_{app}} = -138184.712$$

$$M'w_{app} = -0.002$$

$$M'w = 0.009$$

$$Mw = 632551$$

$$Mq = M'q \times (1/2)\rho U^2 L^3$$

$$(1/2)\rho U^2 L^3 = 70988831.130$$

Hull

$$N'_r = M'_q = 0$$

$$M'q_H = 0$$

Appendage

$$M_{q_{app}} = l_{app}^2 \times Z_{w_{app}}$$

$$l_{app} = -16.300$$

$$Z_{w_{app}} = -8477.590$$

$$M_{q_{app}} = -2252410.811$$

$$M'q_{app} = -0.032$$

$$M'q = -0.032$$

$$Mq = -2252411$$

$$Zdw = Z'dw \times (1/2)\rho U^2 L^2$$

$$(1/2)\rho U^2 L^2 = 2218401$$

Hull

$$Z'_w = -k_z m'$$

$$k_y = k_z = -0.00088 \left(\frac{L}{\bar{d}} \right)^2 + 0.0245 \left(\frac{L}{\bar{d}} \right) + 0.805$$

$$m' = \frac{\Delta}{\frac{1}{2}\rho L^3}$$

$$\bar{d} = \left(\frac{6\Delta}{\pi\rho L} \right)^{0.5}$$

$$\Delta = 235464.025$$

$$L = 32.000$$

$$d = 3.703$$

$$L/d = 8.642$$

$$k_z = 0.951$$

$$m' = 0.014$$

$$Z'dw_H = -0.013$$

Appendage

$$Z'_{w_{app}} = -\frac{m_{added}}{\frac{1}{2}\rho L^3}$$

$$m_{added} = \pi K_a \rho \frac{a^2}{4} b$$

$$a_{(chord)} = 1.452$$

$$b_{(span)} = 1.163$$

$$b/a = 0.801$$

b/a	K _a
1	0.478
1.5	0.68
2	0.84
2.5	0.953

Interpolasi

$$K_a = 0.398$$

$$m_{added} = 785.484$$

$$Z'dw_{app} = -0.000094$$

$$Z'dw = -0.013$$

$$Zdw = -29788$$

$$Zdq = Z'dq \times (1/2)\rho U^2 L^2$$

$$(1/2)\rho U^2 L^2 = 2218401$$

Hull

$$\dot{Z}'_q = \dot{M}'_{\dot{w}} = 0$$

$$Z'dq_H = 0$$

Appendage

$$\dot{Z}'_{q_{app}} = \frac{l_{app} \times \dot{Z}'_{\dot{w}_{app}}}{L}$$

$$l_{app} = -16.300$$

$$Z'dw_{app} = -0.000094$$

$$Z'dq_{app} = 0.000048$$

$$Z'dq = 0.000048$$

$$Zdq = 106$$

$$Mdw = M'dw \times (1/2)\rho U^2 L^3$$

$$(1/2)\rho U^2 L^3 = 70988831.13$$

Hull

$$\dot{Z}'_q = \dot{M}'_{\dot{w}} = 0$$

$$M'dq_H = 0$$

Appendage

$$\dot{M}'_{\dot{w}_{app}} = -\frac{l_{app} \times \dot{Z}'_{\dot{w}_{app}}}{L}$$

$$l_{app} = -16.300$$

$$Z'dw_{app} = -0.000094$$

$$M'dw_{app} = -0.000048$$

$$M'dw = -0.000048$$

$$Mdw = -3383$$

$$Mdq = M'dq \times (1/2)\rho U^2 L^3$$

$$(1/2)\rho U^2 L^3 = 70988831.13$$

Hull

$$\dot{M}'_q = -k_y \dot{I}'_{yy}$$

$$\dot{I}'_{yy} = \frac{I_{yy}}{\frac{1}{2}\rho L^5}$$

$$I_{yy} = I_{zz} = \frac{\pi \rho}{30} L \bar{d}^4 \left(\left(\frac{L}{\bar{d}} \right)^2 + 1 \right)$$

$$\begin{aligned} k_y &= k_z \\ &= 0.951 \\ I_{yy} &= 48868696.445 \\ I'_{yy} &= 0.002842 \\ M'dq_H &= -0.002703 \end{aligned}$$

Appendage

$$M'_{\dot{q}_{app}} = \frac{l_{app}^2 \times Z'_{\dot{w}_{app}}}{L^2}$$

$$\begin{aligned} I_{app} &= -16.300 \\ Z'\dot{w}_{app} &= -0.000094 \\ L &= 32.000 \\ M'\dot{q}_{app} &= -0.000024 \\ M'\dot{q} &= -0.002727 \end{aligned}$$

$$M\dot{q} = -193573$$

$$\begin{aligned} Z_{del} &= Z'_{del} \times (1/2)\rho U^2 L^2 \\ (1/2)\rho U^2 L^2 &= 2218401 \end{aligned}$$

$$Z_{\delta S} = -\frac{1}{2}\rho V_S C_{L_{\delta S}}$$

$$C_{L_{\alpha}} = 2.4$$

$$Z'_{del} = -0.0011$$

$$Z_{del} = -2529$$

$$\begin{aligned} M_{del} &= M'_{de} \times (1/2)\rho U^2 L^3 \\ (1/2)\rho U^2 L^3 &= 70988831.13 \end{aligned}$$

$$M_{\delta S} = -\frac{1}{2}\rho V_S x_{stern} C_{L_{\delta S}}$$

$$x_{stern} = -16.3$$

$$C_{L_{\alpha}} = 2.4$$

$$M'_{de} = 0.00$$

$$M_{del} = -41220$$

$$I_y = I'_y \times (1/2)\rho L^5$$

$$(1/2)\rho L^5 = 17196646400$$

$$\bar{d} = \left(\frac{6\Delta}{\pi \rho L} \right)^{0.5}$$

$$I_{yy} = I_{zz} = \frac{\pi \rho}{30} L \bar{d}^4 \left(\left(\frac{L}{\bar{d}} \right)^2 + 1 \right)$$

$$I_y = 48868696$$

Koefisien	Dimensional	Non-Dimensional
Zw	-22739	-0.01025
Zq	138185	0.06229
Mw	632551	0.00891
Mq	-2252411	-0.03173
Zdw	-29788	-0.01343
Zdq	106	0.00005
Mdw	-3383	-0.00005
Mdq	-193573	-0.00273
Zdel	-2529	-0.00114
Mdel	-41220	-0.00058
Iy	48868696	0.00284

SUBSYSTEM HEADING

$$Y_v = Y'_v \times (1/2)\rho U^2 L^2$$

$$(1/2)\rho U^2 L^2 = 2218401$$

Hull

$$Y'_v = Z'_w$$

$$Y'_v_H = -0.0064$$

Appendage

$$Y_{v_{app}} = -\frac{1}{2}\rho V S_a (C_{L_\alpha} + C_D)$$

Sail

$$C_{L_\alpha} = 2.1000$$

$$C_D = 0.0150$$

$$S_a = 2.1998$$

$$Y_{v_{app}} = -4902.4204$$

$$Y'_v_{app} = -0.0022$$

Rudder

$$\begin{aligned}
C_{L\alpha} &= 2.4000 \\
C_D &= 0.0100 \\
S_a &= 3.3384 \\
Y_{v_{app}} &= -8477.5897 \\
Y'_{v_{app}} &= -0.0038 \\
Y'_v &= -0.0125
\end{aligned}$$

$$Y_v = -27641$$

$$\begin{aligned}
Y_r &= Y'_r \times (1/2)\rho U^2 L^2 \\
(1/2)\rho U^2 L^2 &= 2218401
\end{aligned}$$

Hull

$$Y'_r = Z'_q = 0$$

$$Y'_{r_H} = 0$$

Appendage

$$Y_{r_{app}} = l_{app} \times Y_{v_{app}}$$

Sail

$$\begin{aligned}
l_{app} &= 6.118 \\
Y_{v_{app}} &= -4902.420 \\
Y_{r_{app}} &= -29993.498 \\
Y'_{r_{app}} &= -0.014
\end{aligned}$$

Rudder

$$\begin{aligned}
l_{app} &= -16.300 \\
Y_{v_{app}} &= -8477.590 \\
Y_{r_{app}} &= 138184.712 \\
Y'_{r_{app}} &= 0.062 \\
Y'_r &= 0.112
\end{aligned}$$

$$Y_r = 248840$$

$$\begin{aligned}
N_v &= N'_v \times (1/2)\rho U^2 L^3 \\
(1/2)\rho U^2 L^3 &= 70988831.13
\end{aligned}$$

Hull

$$N'_v = -(k_y + k_x)m'$$

$$k_y = k_z = -0.00088 \left(\frac{L}{\bar{d}} \right)^2 + 0.0245 \left(\frac{L}{\bar{d}} \right) + 0.805$$

$$k_x = -0.00047 \left(\frac{L}{\bar{d}} \right)^2 + 0.0134 \left(\frac{L}{\bar{d}} \right) - 0.059$$

$$\begin{aligned}
 k_y &= 0.951 \\
 k_x &= 0.021702258 \\
 m' &= 0.014 \\
 N'v_H &= -0.014
 \end{aligned}$$

Appendage

$$N_{v_{app}} = l_{app} \times Y_{v_{app}}$$

Sail

$$\begin{aligned}
 l_{app} &= 6.118 \\
 Y_{v_{app}} &= -4902.420 \\
 N_{v_{app}} &= -29993.498 \\
 N'v_{app} &= 0.000
 \end{aligned}$$

Rudder

$$\begin{aligned}
 l_{app} &= -16.300 \\
 Y_{v_{app}} &= -8477.590 \\
 N_{v_{app}} &= 138184.712 \\
 N'v_{app} &= 0.002 \\
 N'v &= -0.012
 \end{aligned}$$

$$Nv = -859985$$

$$\begin{aligned}
 Nr &= N'r \times (1/2)\rho U^2 L^3 \\
 (1/2)\rho U^2 L^3 &= 70988831.13
 \end{aligned}$$

Hull

$$N'_r = M'_q = 0$$

$$N'r_H = 0$$

Appendage

$$N_{r_{app}} = l_{app}^2 \times Y_{v_{app}}$$

Sail

$$\begin{aligned}
 l_{app} &= 6.1181 \\
 Y_{v_{app}} &= -4902.4204 \\
 N_{r_{app}} &= -183503.2211 \\
 N'r_{app} &= -0.0026
 \end{aligned}$$

Rudder

$$\begin{aligned}
 l_{app} &= -16.3000 \\
 Y_{v_{app}} &= -8477.5897 \\
 N_{r_{app}} &= -2252410.8108 \\
 N'r_{app} &= -0.0317 \\
 N'r &= -0.0343
 \end{aligned}$$

$$Nr = -2435914$$

$$Y_{dv} = Y'_{dv} \times (1/2)\rho U^2 L^2$$

$$(1/2)\rho U^2 L^2 = 2218400.973$$

Hull

$$Y'_{\dot{v}} = -k_y m'$$

$$k_y = 0.95101$$

$$m' = 0.01402$$

$$Y'_{dv_H} = -0.01333$$

Appendage

$$Y'_{\dot{v}_{app}} = -\frac{m_{added}}{\frac{1}{2}\rho L^3}$$

$$m_{added} = \pi K_a \rho \frac{a^2}{4} b$$

Sail

$$a = 4.02710$$

$$b = 0.50000$$

$$b/a = 0.12416$$

b/a	K _a
1	0.478
1.5	0.68
2	0.84
2.5	0.953

Interpolasi

$$K_a = 0.12416$$

$$m_{added} = 810.49597$$

$$Y'_{dv_{app}} = -0.00005$$

Rudder

$$a = 1.45220$$

$$b = 1.16345$$

$$b/a = 0.80116$$

b/a	K _a
1	0.478
1.5	0.68
2	0.84
2.5	0.953

Interpolasi

$$K_a = 0.39767$$

$$m_{added} = 785.48399$$

$$Y'dv_{app} = -0.00009$$

$$Y'dv = -0.01348$$

$$Ydv = -29895$$

$$Ydr = Y'dr \times (1/2)\rho U^2 L^2$$

$$(1/2)\rho U^2 L^2 = 2218400.973$$

Hull

$$Y'_r = N'_v = 0$$

$$Y'dr_H = 0$$

Appendage

$$Y'_{r_{app}} = \frac{l_{app} \times Y'_{v_{app}}}{L}$$

Sail

$$l_{app} = 6.11810$$

$$Y'dv_{app} = -0.00005$$

$$Y'dr_{app} = -0.00001$$

Rudder

$$l_{app} = -16.30000$$

$$Y'dv_{app} = -0.00009$$

$$Y'dr_{app} = 0.00005$$

$$Y'dr = 0.00004$$

$$Ydr = 85$$

$$Ndv = N'dv \times (1/2)\rho U^2 L^3$$

$$(1/2)\rho U^2 L^3 = 70988831.13$$

Hull

$$Y'_r = N'_v = 0$$

$$N'dv_H = 0$$

Appendage

$$N'_{v_{app}} = \frac{l_{app} \times Y'_{v_{app}}}{L}$$

Sail

$$l_{app} = 6.1181$$

$$Y'dv_{app} = 0.0000$$

$$L = 32.0000$$

$$N'dv_{app} = 0.0000$$

Rudder

$$l_{app} = -16.3000$$

$$Y'dv_{app} = -0.0001$$

$$L = 32.0000$$

$$N'dv_{app} = 0.0000$$

$$N'dv = 0.0000$$

$$Ndv = 2728$$

$$Ndr = N'dr \times (1/2)\rho U^2 L^3$$

$$(1/2)\rho U^2 L^3 = 70988831.13$$

Hull

$$N'_r = -k_z I'_{zz}$$

$$k_z = 0.951$$

$$I'_{zz} = I'_{yy} = 0.003$$

$$N'dr_H = -0.003$$

Appendage

$$N'_{r_{app}} = \frac{l_{app}^2 \times Y'_{v_{app}}}{L^2}$$

Sail

$$l_{app} = 6.118$$

$$Y'dv_{app} = 0.000$$

$$L = 32.000$$

$$N'dr_{app} = 0.000$$

Rudder

$$l_{app} = -16.300$$

$$Y'dv_{app} = 0.000$$

$$L = 32.000$$

$$N'dr_{app} = 0.000$$

$$N'dr = -0.003$$

$$Ndr = -193698$$

$$Ydel = Y'del \times (1/2)\rho U^2 L^2$$

$$(1/2)\rho U^2 L^2 = 2218400.973$$

$$Y_{\delta R} = \frac{1}{2} \rho V_R C_{L_{\delta R}}$$

$$C_{L_{\alpha}} = 2.40$$

$$Y'_{\text{del}} = 0.001$$

$$Y_{\text{del}} = 2529$$

$$N_{\text{del}} = N'_{\text{del}} \times (1/2)\rho U^2 L^3$$

$$(1/2)\rho U^2 L^3 = 70988831.13$$

$$N_{\delta R} = \frac{1}{2} \rho V_R x_{\text{rudder}} C_{L\delta R}$$

$$x_{\text{rudder}} = -16.300$$

$$C_{L\alpha} = 2.40$$

$$N'_{\text{del}} = -5.81\text{E-}04$$

$$N_{\text{del}} = -41220$$

$$I_z = I'_{zz} \times (1/2)\rho L^5$$

$$(1/2)\rho L^5 = 17196646400$$

$$I_{yy} = I_{zz}$$

$$I'_{zz} = 0.00284$$

$$I_z = 48868696$$

Koefisien	Dimensional	Non-Dimensional
Yv	-27641.159	-0.01246
Yr	248839.793	0.11217
Nv	-859985.432	-0.01211
Nr	-2435914.032	-0.03431
Ydv	-29895.073	-0.01348
Ydr	85.237	0.00004
Ndv	2727.570	0.00004
Ndr	-193698.125	-0.00273
Ydel	2528.880	0.00114
Ndel	-41219.985	-0.00058
Iz	48868696.445	0.00284

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Bekasi, Jawa Barat pada tanggal 3 Agustus 1996 dengan nama Josua Joel Jireh Dededaka dan merupakan anak kedua pasangan Freddy Dededaka dan Vinno Kumentas. Penulis menempuh jenjang Pendidikan mulai dari SD Marsudirini Bekasi (2002 – 2008), SMP Marsudirini Bekasi (2008 – 2011) dan SMA Marsudirini Bekasi (2011 – 2014). Setelah lulus dari bangku Sekolah Menengah Atas (SMA), penulis diterima di Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2014. Selama menempuh masa studi, penulis aktif di beberapa kegiatan dan organisasi. Penulis merupakan anggota dari Marine Electrical and Automation

System Laboratory DTSP ITS. Selama masa perkuliahan, penulis juga pernah mengikuti PKM yang diselenggarakan oleh DIKTI dan lolos sampai tahap PKM yang didanai. Pada masa perkuliahan, penulis juga melakukan kerja praktik di dua tempat yaitu di PT. Lamongan Marine Industry dan PT. Adhiguna Keruktama.